

Brückenlager. 1850-1950

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von Dipl.-Ing. Volker Wetzck, geboren am 30. Januar 1968 in Cottbus

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Werner Lorenz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Gutachter: Dr.-Ing. Karl-Eugen Kurrer

Tag der Disputation: 25. November 2010

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung der BTU Cottbus. In den Jahren der Bearbeitung konnte ich mich auf die Hilfe vieler Kollegen und Freunde verlassen, für die ich mich an dieser Stelle herzlichst bedanke.

Mein Dank geht in erster Linie an Prof. Dr.-Ing. Werner Lorenz, der mir 2002 die Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Lehrstuhl anbot und somit diese Arbeit im Umfeld seines Lehrstuhls ermöglichte. Ihm sei darüber hinaus für die kritische Begleitung und wertvollen Anregungen während der Bearbeitung sowie für die abschließende Begutachtung gedankt. Mein Dank geht auch an Dr.-Ing. Karl-Eugen Kurrer für die jederzeit interessanten Diskussionen. Ihm und Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler danke ich für die Bereitschaft, diese Arbeit zu begutachten.

Bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Bibliotheken und Archive, die meine Arbeit stets wohlwollend unterstützten. Hier gilt mein besonderer Dank Frau Erika Haude vom IKMZ der BTU, der es (fast) immer gelang, praktisch unauffindbare Quellen aus dem weltweiten Netz von Datenbanken und Bibliothekskatalogen hervorzuzaubern. Mein Dank geht auch an Volker Mende M.A., der im Rahmen eigener Archivrecherchen stets seinen Blick für das Thema meiner Arbeit offen hielt.

Ich danke den Mitarbeitern am Lehrstuhl für das allzeit hervorragende Arbeitsklima, in dem diese Arbeit entstehen konnte. Dies gilt vor allem meinen früheren Kollegen – Dr.-Ing. Michael Fischer, der den entscheidenden Anstoß bei der Wahl des Themas gab sowie Dipl.-Ing. (FH) Lydia Hahmann für die kritischen Hinweise während der Bearbeitung. Mein Dank geht an Simone Irmischer für die geduldige Bearbeitung der Abbildungen sowie an Barthold Pelzer für sein Engagement beim Korrektorat der Arbeit.

Zudem danke ich von ganzem Herzen meiner Familie für ihre Unterstützung – vor allem meiner Lebenspartnerin und meinem kleinen Sohn, die viel Zeit ohne mich verbringen mussten sowie meiner Mutter, die sich durch Hilfestellung beim Lesen historischer handschriftlicher Dokumente direkt in die Arbeit einbringen konnte. Mein leider viel zu früh verstorbener Vater konnte mich hingegen nicht mehr unterstützen.

Die vorliegende Arbeit bot die Gelegenheit, den von mir erreichten Erkenntnisstand zur geschichtlichen Entwicklung der Brückenlagertechnik zusammenzufassen. Trotz aller Intensität und Sorgfalt bei der Recherche liegt es in der Sache begründet, dass eine derart ausgerichtete Arbeit immer nur den aktuellen Kenntnisstand abbilden kann. Vor diesem Hintergrund bleibe ich offen für jegliche Anregungen und Hinweise zur historischen Lagertechnik.

Volker Wetzck, Cottbus, im März 2010

Kurzfassung

Mit der Zunahme von Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Brückentragwerken rücken auch die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager wieder in den Fokus der Ingenieure. Das Fehlen verlässlicher Grundlagen für eine statisch-konstruktive Bewertung dieser Lager gab Anlass für die vorliegende Dissertation, die im Wesentlichen drei Punkte bearbeitet:

In einem ersten Schritt wird die Geschichte der Brückenlager unter genealogischen Gesichtspunkten von den Anfängen bis zur Gegenwart aufgearbeitet. Aus den Ursachen, die zur Einführung wie auch zur Ablösung der gusseisernen und stählernen Brückenlager führten, werden deren spezifische Vor- und Nachteile abgeleitet.

Im zweiten und dritten Schritt der Arbeit stehen ausschließlich die gusseisernen und stählernen Brückenlager im Mittelpunkt, die zwischen 1850 und 1950 wichtiger Bestandteil eines jeden größeren Brückenbauwerks waren. Diese einhundert Jahre bilden prinzipiell den Untersuchungszeitraum der vorliegenden Arbeit. Da die Impulse bei der Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlagertechnik vornehmlich aus Deutschland kamen, konnten sich die Untersuchungen auf den deutschsprachigen Raum konzentrieren, ohne jedoch den Blick für entsprechende Arbeiten im Ausland zu verlieren.

Auf den Erkenntnissen zur Entwicklungsgeschichte der Brückenlagertechnik aufbauend, werden die gusseisernen und stählernen Brückenlager zunächst typologisch erfasst. Im Anschluss wird der bauaufsichtliche und technikgeschichtliche Hintergrund der Lagerherstellung innerhalb des Untersuchungszeitraumes erläutert.

Abschließend fokussiert die Arbeit die hauptsächlichen Problembereiche der historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager, die aus der für Brückenlager geforderten Kinematik an den beweglichen Lagern resultierten. Kern der Untersuchungen bilden die zur Sicherstellung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Lager entwickelten Bemessungsansätze bzw. die in diesem Zusammenhang veranlassten Versuche.

Die genannten Punkte werden im Wesentlichen durch Auswertung historischer Literatur sowie ausgewählter Archivmaterialien erarbeitet. Ein der Arbeit beiliegender Katalog fungierte dabei als Hilfsmittel, um bei der Auswertung des umfassenden Quellenmaterials die für diese Arbeit relevanten Inhalte nach spezifischen Kriterien ordnen zu können.

Abstract

We can observe a growing demand for the refurbishment or the retrofitting of the load-bearing structures in numerous historical bridges. Thus their bearings made from either cast iron or steel are finally re-entering the focus of the structural engineers. The absence of reliable data for the structural assessment of these core-elements forms the point of departure for the following thesis, which elaborates three related themes.

In a first step the history of the bearings from their humble beginnings to the present will be outlined in a genealogical perspective. The reasons which led to the development of cast-iron and steel bridge bearings as well as those factors which caused them to be superseded by bearings made from other materials will feed our discussion of both their relative merits and their disadvantages.

Parts two and three will again restrict the focus on cast-iron and steel bridge bearings. They were integral to virtually every major bridge between 1850 and 1950, the main period for this investigation. Since the major advances and developments of bridge bearings from these materials took place in Germany, the following will concentrate on their evolution in the German spoken countries of Central Europe. Achievements in other countries, if pertinent to the development of the bearings, however, will be taken into account.

Based on the findings regarding their evolution a typological categorisation of the bearings will be introduced. Secondly we will analyse the contexts of their technological development as well as the way in which the nascent building supervision authorities influenced these processes.

Finally the thesis will describe the main areas where the bridge bearings made from either cast-iron or steel nowadays are facing problems resulting from their moveable parts. The material for this discussion will be provided by those rules and formulas the engineers arrived at either based on calculations or with the help of experiments to warrant suitable load-carrying capacity and the serviceability of the bearings.

The analysis of these points will be mainly based upon an evaluation of the historical literature tackling questions of the bearings and selected sources from selected archives.

A catalogue added to this thesis worked as a tool to organize the body of these sources according to specific criteria relevant for our purposes.

Redaktionelle Hinweise

In der vorliegenden Arbeit erfolgen die Quellenverweise im Fließtext direkt im Anschluss an eine Aussage, Zitat o.ä. in eckigen Klammern – z.B. [231/S.23]. Die erste Nummer verweist dabei auf die bibliographische Zusammenstellung der verwendeten Quellen im Literaturverzeichnis, die folgende gibt die Seite im jeweiligen Werk an. Bei Angabe mehrerer Quellen erfolgt der Verweis über eine Fußnote. Querverweise im Text auf den beiliegenden Katalog erfolgen durch Angabe der Katalognummer, gefolgt von einer laufenden Nummer zur konkreten Einordnung, z.B. [K5-24]. Tabellarische Zusammenstellungen erhalten in der Regel einen Verweis auf den Katalog, welcher die dazugehörigen Quellen aufführt.

Abbildungen werden in der Arbeit in unmittelbarer Nähe zum relevanten Textteil platziert. Sie setzen sich aus zwei oder auch mehreren Einzelabbildungen zum Thema zusammen, welche – im Regelfall nebeneinander angeordnet – die Gesamtabbildung ergeben. Diese Zusammenfassung und verkleinerte Darstellung von Einzelabbildungen erfolgte mit Rücksicht auf den Gesamtumfang der insgesamt reich bebilderten Arbeit. Es sei bemerkt, dass insbesondere bei älteren Quellen die Qualität der Druckvorlage nicht immer den Erwartungen entsprach.

Die Arbeit enthält kein separates Abbildungsverzeichnis. Die Quellen zu Abbildungen sind direkt in der Bildunterschrift angegeben. Folgt zudem der Name des Fotografen, so ist damit Forderungen entsprechender Archive Rechnung getragen worden.

Zitate werden in den Fließtext eingebaut. Längere Anführungen jedoch heben sich durch eine abweichende Formatierung vom Fließtext ab und verdeutlichen so Anfang und Ende des zitierten Textes.

Der überwiegende Teil der ausgewerteten Literatur datiert ins 19. Jahrhundert und bezieht sich bei Angabe technischer Details auf die damals üblichen Maß- und Gewichtseinheiten. Diese nunmehr historischen Einheiten werden für diese Arbeit übernommen.

Der Autor ist bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit bemüht gewesen, konsequent die Richtlinien der so genannten Neuregelung der deutschen Rechtschreibung umzusetzen. Obwohl seit Einführung der neuen Regeln inzwischen über 10 Jahre vergangen sind, mögen dem Leser vereinzelt Schreibweisen eventuell noch immer ungewohnt erscheinen. Selbstverständlich blieben Zitate davon unberührt und wurden in ihrer ursprünglichen Schreibweise übernommen.

Inhalt

Vorwort	II
Kurzfassung.....	III
Abstract.....	IV
Redaktionelle Hinweise	V
Inhalt.....	VI
1 EINLEITUNG	1
1.1 Anlass.....	1
1.2 Hintergrund.....	1
1.3 Abgrenzung	2
2 PROBLEMSTELLUNG	3
2.1 Stand der Forschung.....	3
2.2 Ziel der Arbeit	4
2.3 Methodik der Bearbeitung.....	5
2.4 Grundlagen und Quellen	7
3 BEGRIFFE.....	9
3.1 Brückenlager	9
3.2 Historische gusseiserne und stählerne Brückenlager.....	9
3.3 Unterbau, Überbau, Oberbau.....	10
3.4 Eisen und Stahl	10
4 BRÜCKENLAGER – GESCHICHTE UND ENTWICKLUNG	11
4.1 Anfänge in Holz.....	11
4.2 Probleme mit Eisen als Konstruktionswerkstoff	12
4.2.1 Die Ursache: Temperatur	12
4.2.2 Die Lösung: Beweglichkeit.....	13
4.2.3 Die Methode: Brückenlager	14
4.3 Entwicklung einer Technologie – am Beispiel der Lager für Balkenbrücken.....	16
4.3.1 Flächenlager	17
4.3.2 Kipplager.....	20
4.3.3 Zwischenlösungen	25
4.3.4 Verformungslager	27
4.3.5 Generationswechsel	30
4.3.6 Integralbrücken	31

4.4	Entwicklungen jenseits der Balkenbrücken.....	33
4.4.1	Bogenbrücken.....	33
4.4.2	Entwicklungen im Hochbau	44
4.5	Zusammenfassung	54
5	GUSSEISERNE UND STÄHLERNE BRÜCKENLAGER IN DEUTSCHLAND.....	56
5.1	Kontext	56
5.1.1	Wissenschaftliche und industrielle Emanzipation.....	57
5.1.2	Auswirkungen im Brückenbau	60
5.1.3	Einfluss auf Brückentheorie und -konstruktion	62
5.1.4	Entwicklungen in den Vereinigten Staaten von Amerika.....	66
5.1.5	Patente als Spiegel der Entwicklung	67
5.1.6	Wertung und Zusammenfassung	72
5.2	Typologische Erfassung	73
5.2.1	Existierende Ansätze.....	74
5.2.2	Typologie	76
5.2.3	Wertung und Zusammenfassung	80
5.3	Bauaufsichtliche Verankerung	81
5.3.1	Vorbemerkungen	81
5.3.2	Anfänge.....	82
5.3.3	Regelwerke der Staatseisenbahnen.....	83
5.3.4	Regelwerke der Deutschen Reichs- und Bundesbahn.....	87
5.3.5	Regelwerke für Straßenbrücken.....	92
5.3.6	Ausblick auf die Entwicklung nach dem Untersuchungszeitraum	93
5.3.7	Regelwerke zu Brückenlagern.....	95
5.3.8	Wertung und Zusammenfassung	99
5.4	Verwendetes Material	101
5.4.1	Begriffe und Bezeichnungen.....	101
5.4.2	Material	105
5.4.3	Zusammenfassung	107
5.5	Herstellung und Eigenschaften	108
5.5.1	Fertigungstechnische Einflüsse.....	108
5.5.2	Materialtechnische Einflüsse	116
5.5.3	Qualitätskontrolle	122
5.5.4	Wertung und Zusammenfassung	126

6	BEWEGUNGSLAGER IN GUSSEISEN UND STAHL	127
6.1	Das Berührungsproblem	127
6.1.1	Anfänge.....	128
6.1.2	Theoretische Bemessung	129
6.1.3	Praktische Versuche	135
6.1.4	Anwendbarkeit vs. Gültigkeit	141
6.1.5	Wertung	143
6.1.6	Zusammenfassung	146
6.2	Das Reibungsproblem	147
6.2.1	Anfänge.....	148
6.2.2	Frühe Erfahrungen an Brückenlagern	152
6.2.3	Praktische Versuche	156
6.2.4	Erkenntnisse der Versuche im Spiegel der Fachliteratur	160
6.2.5	Bewegliche Brückenlager – die Praxis	164
6.2.6	Dimensionierung der Wälzkörper	165
6.2.7	Wertung	169
6.2.8	Zusammenfassung	170
6.3	Ermüdung, Verschleiß	171
6.3.1	Praktische Versuche	171
6.3.2	Theoretische Bemessung	173
6.3.3	Weitere Erkenntnisse und Ausblick	173
6.3.4	Wertung und Zusammenfassung	176
7	GUSSEISERNE UND STÄHLERNE BRÜCKENLAGER IN DEN USA	178
7.1	Bemessung der Wälzkörper.....	179
7.2	Versuche	182
7.3	Wertung und Zusammenfassung	185
8	ZUSAMMENFASSUNG	187
9	AUSBLICK	190
10	LITERATUR.....	192
11	ANLAGEN	217
11.1	Katalog	217
11.2	Übersichten	298

1 Einleitung

1.1 Anlass

Nach Abschluss seines Studiums war der Verfasser im Ingenieurbüro des Erstbetreuers dieser Arbeit, Prof. Dr.-Ing. Werner Lorenz, mit der statisch-konstruktiven Begutachtung eines Teilstücks der Hochbahnlinie U2 in Berlin-Prenzlauer Berg betraut. Die Begutachtung beschränkte sich zunächst auf die Untersuchung der stählernen Überbauten, wurde später aber auf die über 530 stählernen Brückenlager des Viadukts ausgedehnt, die nahezu vollständig noch aus dessen Erbauungszeit zwischen 1909 und 1930 stammen. Dabei offenbarte sich schnell der absolut unbefriedigende Kenntnisstand zu allen Fragen einer statisch-konstruktiven Beurteilung der historischen Lagertechnik. Die offenkundigen Desiderate einer angemessenen statisch-konstruktiven Beurteilung historischer gusseiserner und stählerner Brückenlager gaben den Impuls, die geschichtlichen Grundlagen der Lagerherstellung und -dimensionierung im Rahmen einer Dissertation aufzuarbeiten.

1.2 Hintergrund

Im Laufe der letzten 200 Jahre entwickelten sich Brückenlager zu neuralgischen Punkten innerhalb von Brückentragwerken. Immer größere Spannweiten gingen einher mit immer größer werdender Belastung. So wurde es ein Gebot der Sicherheit, die bei der statischen Berechnung angesetzten Lagerungsbedingungen am realen Tragwerk auch zu verwirklichen. Ganz im Gegensatz zur wachsenden konstruktiven Bedeutung der Brückenlager innerhalb des Gesamttragwerks entzogen sich die Lagerkörper bald jedoch der öffentlichen Wahrnehmung. Zeigten Ingenieure noch im frühen 20. Jahrhundert stolz ihre teilweise wuchtigen Lagerkörper als wesentlichen Bestandteil ihres Bauwerks, so entdeckt heutzutage nur noch das geschulte Auge die kleinen Kästen, deren Wirkungsweise sich dem Laien nicht mehr erschließt. Der Einsatz neuer Materialien gepaart mit einem veränderten Verständnis für Gestaltung hat dazu geführt, dass Brückenlager heute innerhalb eines Tragwerks und ebenso in der öffentlichen Wahrnehmung unterzugehen scheinen. Spiegel dieser Entwicklung ist die stiefmütterliche Behandlung von Lagern in der aktuellen Fachliteratur sowie die mangelnde Präsenz spezifischer Lehreinheiten zur Lagertechnik in der universitären Ausbildung.

Doch selbst ein Jahrhundert nach der Blütezeit der gusseisernen und stählernen Brückenlagertechnik entstammen viele der nach wie vor genutzten Brücken innerhalb des Straßen- und mehr noch des Schienennetzes der Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg. So befinden sich zum Beispiel im Bestand der ca. 32 000 Brücken im Netz der Deutschen Bahn AG ca. 6000

Stahlbrücken, die vor 1945 errichtet wurden und die fast ausnahmslos auf originalen Brückenlagern ruhen¹. Schon aus wirtschaftlichen Gründen können diese Bauwerke nicht ersetzt werden. Dazu kommt oft ein denkmalpflegerischer Wert, der ein wahlloses Verstärken oder Austauschen einzelner Bauteile oder ganzer Bauwerke wenn möglich ausschließt. Berücksichtigt man zusätzlich den nach wie vor wachsenden Bedarf an Bahn- und Straßenbrücken, so ist der Erhalt der bestehenden Brückensubstanz nicht nur eine ingenieurtechnische, sondern zugleich eine volkswirtschaftliche Herausforderung geworden.

Vor diesem Hintergrund existieren seit dem ausgehenden 20. Jahrhundert verstärkte Bemühungen um die noch erhaltenen historischen Brückenbauwerke, die sich jedoch auf die Begutachtung und Beurteilung der Überbauten konzentrierten. Die dazugehörigen Lagerkörper blieben bei diesen Bemühungen unberücksichtigt. Kann sich also ein begutachtender Ingenieur heute auf sehr fundierte Empfehlungen zum Umgang mit den alten Überbauten stützen, so bleiben bezüglich der dazugehörigen Lagerkörper noch immer ganz grundsätzliche Fragen unbeantwortet, wie z.B. zum verwendeten Material, zur Herstellung und zur zeitgenössischen Bemessung. Die vorliegende Arbeit versucht, diese Kenntnislücken zu schließen.

1.3 Abgrenzung

Nach einer Darstellung der geschichtlichen Entwicklung der Lagertechnik insgesamt konzentriert sich die Arbeit auf die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager und den dieser Technik zugeschriebenen Anwendungszeitraum, der auf das Jahrhundert zwischen 1850 und 1950 – nachfolgend Untersuchungszeitraum genannt – datiert werden kann. Eine erste Beschreibung der bauaufsichtlichen Verankerung sowie wesentlicher Grundlagen der Herstellung thematisiert noch die gusseisernen und stählernen Brückenlager als Ganzes. Die sich anschließende Erörterung statisch-konstruktiver Fragen, die sich aus der geforderten Kinematik der Lager ergaben, fokussiert einzig die beweglichen Lager dieser Generation. Auf Grund der Vormachtstellung des deutschen Brückenbaus im Untersuchungszeitraum konnten sich die Untersuchungen aus regionaler Sicht auf den deutschsprachigen Raum konzentrieren, ohne dabei jedoch den Blick für Entwicklungen im europäischen Ausland zu verlieren. Die parallele aber weitgehend losgelöste Entwicklung in den USA wird in einem abschließenden Kapitel zusammengefasst.

¹ Angaben nach [657]. Aktuelle Zahlen zum Bestand an Bahnbrücken sind kaum publiziert. Eine vergleichende Angabe nach [508/S.487]: „Im Schienennetz der Deutschen Bahn sind heute über 8000 Stahlbrücken zu finden, von denen die Hälfte über 80 Jahre und 40 % sogar über 100 Jahre alt sind“.

2 Problemstellung

2.1 Stand der Forschung

Nach einer intensiven Forschungstätigkeit zu gusseisernen und stählernen Brückenlagern während der Blütezeit des Eisenbahnbaus in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ruhte die wissenschaftliche Arbeit im Wesentlichen seit der Wende zum 20. Jahrhundert. Insbesondere die aufkommende Konkurrenz durch die sich entwickelnde Eisenbetonbauweise hatte den Wettbewerb um Marktanteile im Brückenbau in Deutschland verschärft. Die hauptsächlichlichen Einsatzfelder stählerner Brückenbauten sollten sich bald auf Tragwerke größerer Spannweite, Aufträge im Ausland bzw. auf Spezial- oder Sonderbauten – wie bewegliche Brücken oder auch Viaduktbauten – reduzieren. Politische Ereignisse und wirtschaftliche Bedingungen – wie der Erste Weltkrieg, Inflation, Weltwirtschaftskrise – entzogen im frühen 20. Jahrhundert den Rahmen für nennenswerte Forschungen. Darüber hinaus fehlte es auch an der Notwendigkeit, denn zum einen hatten sich die gusseisernen und stählernen Brückenlager bereits seit Jahrzehnten in der Praxis bewährt, und zum anderen gab es nur noch einen vergleichsweise geringen Bedarf an diesen Lagern.

Nach dem Zweiten Weltkrieg konzentrierten sich die Forschungen zu Brückenlagern bald auf die Entwicklung und Einführung einer neuen Lagergeneration, der Verformungslager. Die Notwendigkeit ergab sich jetzt aus der Vielzahl von Brückenbauwerken, die im Zuge infrastruktureller Maßnahmen beim Ausbau des Straßennetzes zu errichten waren. Der Einsatz der nunmehr alten gusseisernen und stählernen Brückenlagertechnik beschränkte sich vor allem auf den Wiederaufbau zerstörter Brücken.

Die Nachkriegsforschungen zu neueren Rollenlagern lassen sich schnell skizzieren. Nur 2 von insgesamt 14 seit den 1960er-Jahren in der BRD² eingereichten Dissertationen zum Thema „Brückenlager“ thematisierten noch die Rollenlager: LIERMANN untersuchte den Einfluss von Rollenlagern auf das Tragverhalten des Unterbaus [65]. HAKENJOS reichte 1966 eine Dissertation [47] ein, die die Rollreibung von Stahl im elastisch-plastischen Zustand untersuchte, sich dabei jedoch auf die in den 50er- und 60er-Jahren entwickelten neuartigen, hochfesten Lagerwerkstoffe konzentrierte.

² Bezug auf westdeutsche Hochschulen einschl. Westberlin; [32/S.455].

Der erreichte Kenntnisstand wurde 1974 im Buch *Lager im Bauwesen* [28] zusammengefasst, welches – in reduzierter Autorenschaft – 1995 in der 2. Auflage [32] und 2002 in einer englischen Ausgabe [35] erschien³. Alle Editionen schildern jedoch lediglich die Entwicklungen seit den 1950er Jahren. Eine weiter zurückgreifende Behandlung historischer Brückenlagertechnik findet sich kaum – auch nicht im 2005 erschienenen Heft *Brückenlagertechnik in Deutschland – Die Geschichte einer technischen Revolution* [36].

Mit der Zunahme von Sanierungsaufgaben an bestehenden Brückentragwerken im ausgehenden 20. Jahrhundert jedoch sind auch die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager wieder in den Fokus der Ingenieure gerückt. Jahrzehnte der Verdrängung dieser Lagertechnik aus Brückenbauwerken und Forschungseinrichtungen, schließlich aus Fachbüchern und Regelwerken und letztlich auch aus dem Bewusstsein der Ingenieure ergeben heute einen völlig unbefriedigenden Kenntnisstand. Weder existieren verlässliche Angaben zur Qualität des verwendeten Lagermaterials und zum Herstellungsprozess, noch stehen Bemessungsansätze zur Verfügung, die über den Erkenntnisstand des ausgehenden 19. Jahrhunderts hinausgehen.

2.2 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Geschichte der historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager. Dabei sollen grundsätzliche Fragen geklärt werden, wie zum Beispiel

- ...zur Entwicklung der Brückenlager im Allgemeinen:
 - Welche wesentlichen Entwicklungslinien bzw. -schritte lassen sich in der Geschichte der Lagerentwicklung ausmachen?
 - Durch welche Parallelen oder Unterschiede war die Lagertechnik im Brücken- und Hochbau gekennzeichnet?
 - Welches waren wichtige Bedingungen, die zur Einführung und Etablierung der gusseisernen und stählernen Brückenlager führten? Was wiederum führte zur Ablösung dieser Lager durch die heute im Bauwesen üblichen Lagerarten? Welche Vor- und Nachteile der gusseisernen und stählernen Brückenlager lassen sich daraus ableiten?
- ...zur Generation der gusseisernen und stählernen Brückenlager im Untersuchungszeitraum:

³ Die Erstauflage noch von der Autorengemeinschaft EGGERT, GROTE, KAUSCHKE, danach von EGGERT, KAUSCHKE.

- Weshalb kamen ab der Mitte des 19. Jahrhunderts die wesentlichen Impulse bei der Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlager aus Deutschland?
- Durch welche typenkonstituierenden Merkmale ist die Vielfalt der gusseisernen und stählernen Brückenlager gekennzeichnet, und wie lässt sich diese Vielfalt typologisch gliedern und abbilden?
- Seit wann und wie wurden die konstruktive Ausbildung der Lager sowie deren Bemessung bauaufsichtlich geregelt? Welche Materialien kamen bevorzugt zum Einsatz, und welche Herstellungsmethoden beeinflussten ggf. das Endprodukt?
- ...zu den beweglichen Lagern dieser Generation im Speziellen:
 - Welche Probleme resultierten aus der geforderten Kinematik der beweglichen Lager, und in welcher Form beeinflussten diese die bauliche Durchbildung und Bemessung im Untersuchungszeitraum?
 - In welchem Umfang und in welcher Form wurden bereits im Untersuchungszeitraum Probleme des Verschleißes und der Materialermüdung thematisiert?
- und zusammenfassend zur Arbeit:
 - Welches waren die wesentlichen Erkenntnisse, und welche Fragen blieben offen oder konnten nur unzureichend geklärt werden?
 - Welche Fragestellungen können Gegenstand für weiterführende oder neue Forschungen sein?

2.3 Methodik der Bearbeitung

Schon die Benennung der Ziele im Abschnitt 2.2 verdeutlichte das deduktive Vorgehen bei deren Erarbeitung:

In einem ersten Schritt wird zunächst die Entwicklung der Brückenlager von den Anfängen bis zur Gegenwart aufgearbeitet. Aus dem Verständnis dieser allgemeinen Entwicklung heraus konzentriert sich die Arbeit in einem zweiten Schritt auf die Teilmenge der historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager, wobei zunächst noch grundsätzliche Fragestellungen zu Genealogie und Herstellung sowie zur bauaufsichtlichen Verankerung beantwortet werden.

Ein dritter Bearbeitungsschritt thematisiert wiederum eine Teilmenge der historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager. Untersucht werden nun die für die Dilatation des Überbaus erforderlichen beweglichen Brückenlager, war es doch die geforderte Beweglichkeit, ...

- die den Anstoß für die Ausbildung von Brückenlagern im heutigen Verständnis gab,
- die zur Herausbildung von ausschließlich diese Brückenlagertechnik charakterisierenden Konstruktionen führte und
- deren Realisierung mit Problemen einherging, die einerseits die zeitgenössische Lagerausbildung und -bemessung prägten und die prinzipiell auch heute zu Schwierigkeiten bei der Begutachtung des noch erhaltenen Lagerbestandes führen (Abb. 1):

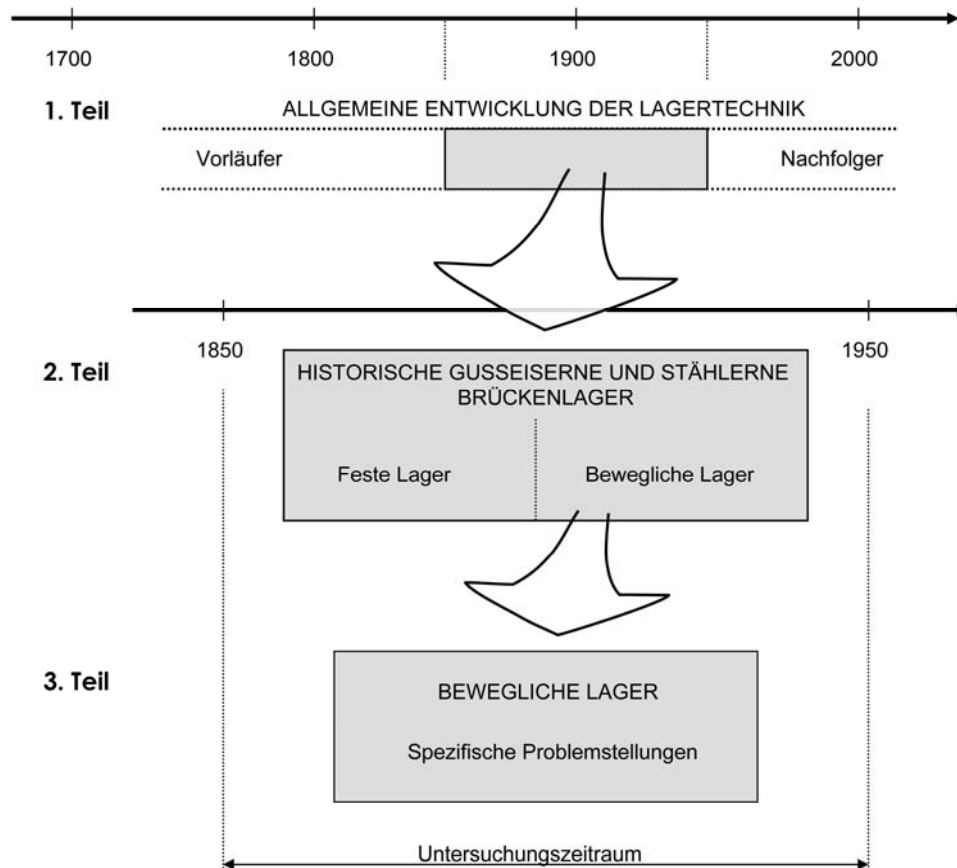


Abb. 1: Methodischer Ansatz der vorliegenden Arbeit

Der dieser Arbeit als Anlage beiliegende Katalog stellte aus methodischer Sicht eine wesentliche Hilfe bei der Erarbeitung der Zielstellungen dar. Er diente im Sinne eines Filters bei der Auswertung der recherchierten Quellen und erleichterte somit die Zusammenstellung der wesentlichen Fakten.

Ergänzende spezifische Anmerkungen zum methodischen Vorgehen bei der Erarbeitung von Einzelfragestellungen werden gegebenenfalls den entsprechenden Abschnitten vorangestellt.

2.4 Grundlagen und Quellen

Die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehenden gusseisernen und stählernen Brückenlager finden sich noch heute an zahlreichen Brückenbauwerken, insbesondere im Netz der Bahn. Für das Studium der historischen Brückenlagertechnik bildete dieser Originalbestand einen wertvollen Fundus, wenngleich es an gut erhaltenen Beispielen aus der Frühzeit des Brückenbaus in Eisen bzw. Stahl inzwischen mangelt.

Eine zweite, ganz wesentliche Grundlage der Arbeit bestand im Studium und Auswertung der Fachbücher und -zeitschriften. Die in Punkt 2.1 erwähnten „Lagerbücher“ bildeten dafür eine gute Quelle, allerdings nur bezüglich der jüngeren Brückenlagertechnik. Für die in dieser Arbeit hauptsächlich thematisierten historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager jedoch musste fast ausschließlich auf die Auswertung der zeitgenössischen Literatur aus dem Untersuchungszeitraum zurückgegriffen werden. Einen Einstieg in die Recherche bildeten dabei zwei für die gesamte Arbeit wichtige Monographien, die gleichzeitig Anfang und Ende der intensiven wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den gusseisernen und stählernen Brückenlagern markierten:

- zum einen WINKLERS⁴ *Die Gitterträger und Lager gerader Träger* von 1875 [108],
- zum anderen KOLLMARS⁵ *Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern und Wälz Gelenken* von 1919 [57].

WINKLERS Werk im Rahmen seiner unvollendet gebliebenen Enzyklopädie *Vorträge über Brückenbau* gilt aus Sicht des Verfassers als erstes Fachbuch, das sich ausführlich der Lagertechnik von Brücken widmete. Es gibt einen guten Überblick zum Stand des Wissens aus einer Zeit beginnender intensiver Forschungstätigkeit zu diesem Thema. Sein Buch ist eine für die Praxis aufbereitete und mit theoretischem Hintergrundwissen kommentierte Sammlung ausgeführter Beispiele seiner Zeit.

KOLLMARS Dissertation⁶ hingegen markierte prinzipiell das Ende der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern und verstand sich als statisch-konstruktive Kritik der gebräuchlichen Lagerkonstruktionen.

⁴ EMIL WINKLER (1835-1888).

⁵ ALFRED KOLLMAR (1890-1971).

⁶ Die Dissertation *Auflager und Gelenke* [...] entstand während KOLLMARS Assistentenzeit am Lehrstuhl für Statik und Brückenbau der TH Dresden bei Prof. W.GEHLER [489]. Sie wurde unmittelbar vor dem Ersten Weltkrieg verfasst, erschien kriegsbedingt aber erst 1919; [57/Vorwort].

Neben diesen beiden Werken sowie einschlägigen Fachbüchern zum Brückenbau in Eisen und Stahl, welche den Brückenlagern unterschiedlich umfangreiche Kapitel einräumten, waren es insbesondere die Fachzeitschriften des 19. Jahrhunderts, in denen die Forschungstätigkeit zu den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern ein Forum fand. Erleichternd für die Auswertung wirkte hier die Tatsache, dass die Impulse bei der Entwicklung dieser Brückenlagertechnik ab ca. 1850 aus Deutschland kamen (vgl. Punkt 5.1). Das Studium der Fachliteratur konnte also im Wesentlichen auf deutschsprachige Quellen begrenzt bleiben, ohne Gefahr zu laufen, wichtige Entwicklungen im Ausland zu verpassen.

Eine dritte Quelle für diese Dissertation waren Besuche ausgewählter Archive. Sie dienten in erster Linie dem Ziel, die in der zur Verfügung stehenden Fachliteratur kaum diskutierten Teilbereiche der historischen Brückenlagertechnik zu beforschen. Hier waren es die Archive der ehemaligen Brückenbauanstalten, in denen sich der Verfasser vertiefende Informationen zur Herstellung von Brückenlagern erhoffte. Darüber hinaus lagerten in diesen Archiven Ausgaben früherer Vorschriften-, Normen- und Regelwerke für den Brückenbau, an denen sich die Brückenbauanstalten seinerzeit orientieren mussten.

3 Begriffe

3.1 Brückenlager

Das Studium der Literatur zeigte, dass Bezeichnungen wie Auflager, Widerlager, Brückenlager oder einfach nur Lager oft nebeneinander ohne Abgrenzung gebraucht werden. Darüber hinaus hat sich als Lager einer Gelenkbogenbrücke das Gelenk als Begriff aus der Baustatik etabliert. Was genau sind Lager bzw. Brückenlager?

DIN 4141 „Lager im Bauwesen“ – Teil 1 definierte 1984 den Begriff „Lager“ wie folgt: „Ein Lager ist ein Bauteil, das die Aufgabe hat, von den 6 Schnittgrößen, die an den Verbindungsstellen zwischen zwei Bauteilen möglich sind (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z), bestimmte, ausgewählte Schnittgrößen (Hauptschnittgrößen des Lagers) ohne oder mit begrenzten Relativbewegungen der Bauteile zu übertragen und im Wirkungssinn der übrigen Schnittgrößen Freiheitsgrade (v_x , v_y , v_z , θ_x , θ_y , θ_z) für Relativbewegungen der Bauteile zu bieten, d.h. Verschiebungen bzw. Verdrehungen zu ermöglichen.“

2001 versuchte *DIN EN 1337 „Lager im Bauwesen“* – Teil 1, den Begriff „Lager“ kürzer zu fassen: „Lager sind Bauteile, die Verdrehungen zwischen zwei Bauwerksteilen ermöglichen und anforderungsgemäß definierte Lasten übertragen und Verschiebungen verhindern (feste Lager) oder in einer Richtung (geführte Lager) oder in allen Richtungen einer Ebene (allseitig bewegliche Lager) erlauben.“

Die genannten Definitionen beziehen sich unmittelbar auf die moderne Lagertechnik im Bauwesen und lassen eine historische Dimension nicht zu. Insbesondere aus diesem Grund – aber auch zur Vereinfachung des Begriffsverständnisses – bezieht sich die vorliegende Arbeit bei der Verwendung des Begriffs „Lager“ auf Bauteile, die zwischen Bauwerksteilen angeordnet werden, um bei der Weiterleitung von Lasten gewünschte Bedingungen zu erfüllen. Brückenlager sind demnach Bauteile, welche diese Funktion an Brückenbauwerken übernehmen.

3.2 Historische gusseiserne und stählerne Brückenlager

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern. Dieser Terminus bezieht sich auf die in der Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte und bis nach dem Zweiten Weltkrieg im Brückenbau übliche Lagertechnik,

- die zunächst hauptsächlich für Eisenbahnbrücken, später auch für Brücken im Straßen- bzw. Wegebau, Anwendung fand,

- die vornehmlich stählernen Überbauten – im 20. Jahrhundert aber auch Brücken aus Stahlbeton bzw. Spannbeton – als Auflager diente,
- deren Bauteile im Wesentlichen aus Gusseisen bzw. Stahlguss gefertigt wurden.

Abb. 2 erläutert exemplarisch die in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung der Bauteile an zwei typischen historischen Brückenlagern.

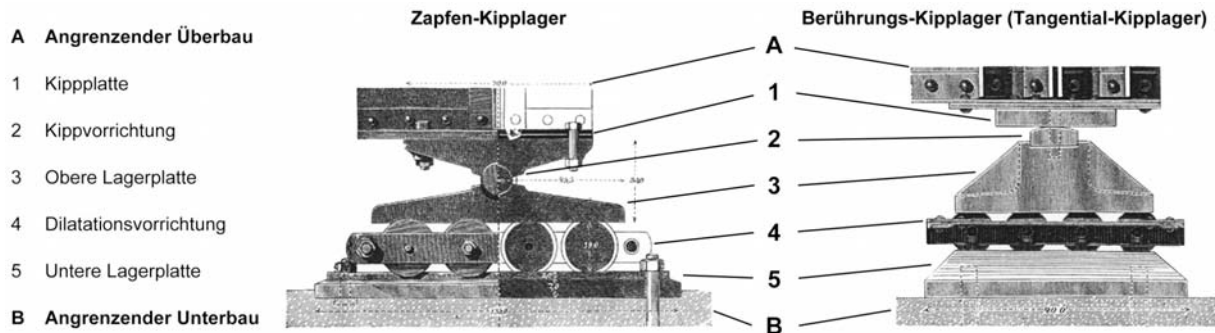


Abb. 2: Bezeichnungen an typischen historischen beweglichen Brückenlagern; Skizzen aus [108]

3.3 Unterbau, Überbau, Oberbau

Soweit in dieser Arbeit verwendet, beziehen sich diese Begriffe wie folgt:

- Oberbau – auf das Gleisbett oder auf den Wege- bzw. Straßenbelag. Der Oberbau zählt im Allgemeinen nicht zur statisch wirksamen Konstruktion,
- Überbau – auf das zur Überbrückung einer Öffnung angewandte Tragwerk, das alle anfallenden Lasten gewöhnlich über Brückenlager in den Unterbau überträgt,
- Unterbau – auf die in der Regel gemauerten oder aus bewehrtem bzw. unbewehrtem Beton gegossenen Auflagerbänke sowie auf deren Fundierung zur Ableitung der Auflagerkräfte in den Baugrund.

Das Brückenlager vermittelt zwischen Überbau- und Unterbau.

3.4 Eisen und Stahl

Die Verwendung der Begriffe Eisen und Stahl ist nach wie vor vom individuellen Zugang abhängig und national wie international von Eindeutigkeit entfernt. In dieser Arbeit wird

- im Kontext aller Werkstoffe (z.B. Holz, Eisen, Beton, ...) der Begriff Eisen im technischen Sinne und nicht im chemischen Sinne als Sammelbegriff für Eisen-Kohlenstofflegierungen gebraucht, zum Beispiel: „Mit dem Aufkommen eiserner Brücken...“.
- im Kontext der spezifischen Eigenschaften jedoch unterschieden zwischen gusseisernen und stählernen (aus Walzstahl bzw. Stahlguss) Brückenlagern.

4 Brückenlager – Geschichte und Entwicklung

Nachfolgend wird nach der Darstellung vorindustrieller Anfänge die Notwendigkeit einer neuen Lagertechnologie beschrieben, um dem Materialverhalten der eisernen Tragwerke bei Temperaturveränderung entsprechen zu können. Die Verfeinerung der neuen Technik zur Realisierung gezielter Lagerungsbedingungen wird exemplarisch am Beispiel der Auflagerung von Balkenbrücken skizziert und durch einen Überblick zur zeitlich parallelen Entwicklung beim Bau von Bogenbrücken bzw. im Hochbau ergänzt.

4.1 Anfänge in Holz

Brückenlager im Sinne der im Punkt 3.1 genannten Definition fanden sich bereits an vorindustriellen Holzbrücken in Form von einfachen hölzernen Schwellen. Sie sollten die Konstruktion „trocken“ lagern und so die Balken des eigentlichen Tragwerks vor dem Verrotten schützen. Die Schwellen konnten bei Bedarf vergleichsweise problemlos ersetzt werden. Neben der Last verteilenden Wirkung ermöglichten Schwellen auch die Durchbiegung des Tragwerks, ohne dabei zu Kantenpressungen zwischen Untergurt und dem gemauerten Auflagerstand zu führen. (Abb. 3)

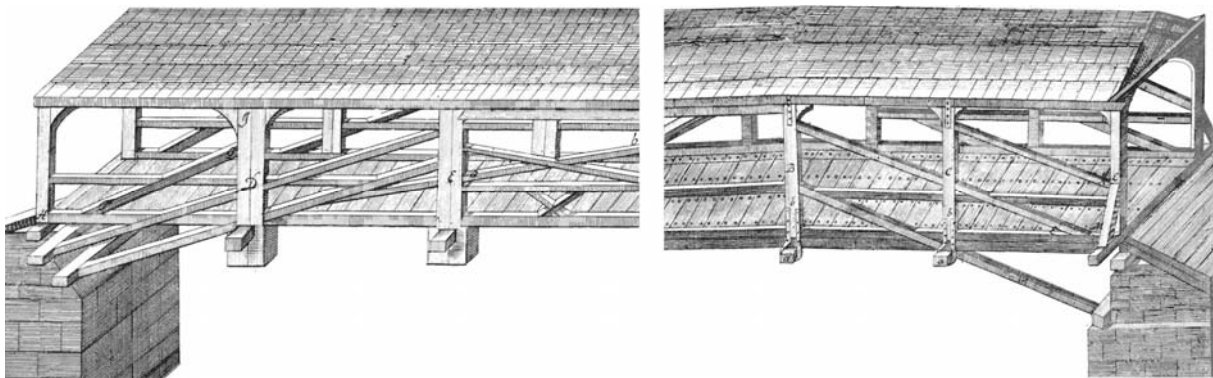


Abb. 3: Beispiele vorindustrieller Holzbrücken [194]

Darüber hinaus vermochten hölzerne Auflager durch ihr dämpfendes Materialverhalten die Erschütterungen des Verkehrs auf das Tragwerk und den Unterbau zu reduzieren. Dieser willkommenen Eigenschaft bediente man sich auch bei den ersten Eisenbahnbrücken, z.B. für die stoßempfindlichen gusseisernen Barrenbrücken des frühen 19. Jahrhunderts [108/S.264]. Großer Auflagerdruck aus Eisenbahnverkehr wurde bei Bedarf durch gusseiserne Balkenschuhe verteilt. Die Ausdehnung des Materials durch Temperaturschwankungen hatte bei diesen ersten eisernen Balkenbrücken noch keine Relevanz. Das Problem als solches war jedoch erkannt. (Abb. 4)

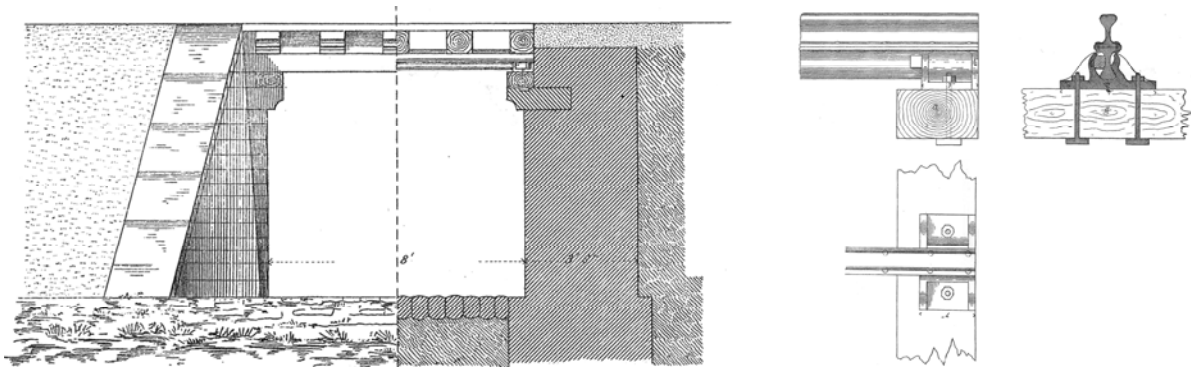


Abb. 4: Wegedurchlass von „8 Fuß Breite“ der thüringischen Bahn von vor 1850; Links: Darstellung der Öffnung, Rechts: Trägerauflager; [264]

4.2 Probleme mit Eisen als Konstruktionswerkstoff

4.2.1 Die Ursache: Temperatur

Schon im 17. Jahrhundert war bekannt, dass Materialien auf Temperaturwechsel mit einer Veränderung ihres Volumens reagieren [233/S.471], was für die damals üblichen Brückentragwerke jedoch ohne Bedeutung war. Hölzerne Brücken waren in der Spannweite begrenzt oder aber aus mehreren Balken zusammengesetzt. An den Verbindungsstellen konnten sich Längenänderungen problemlos ausgleichen, die jedoch auf Grund der Materialeigenschaften des Holzes eher durch schwankende Umgebungsfeuchte als durch Änderung der Temperatur erfolgten. Bei den steinernen Gewölbebrücken verhinderte – damals wie heute – die massive Bauweise ein schnelles Erwärmen oder Abkühlen und somit eine unmittelbare Reaktion des Tragwerks auf veränderte Außenbedingungen. Die Bauteiltemperatur folgte weniger den kurzzeitigen Temperaturgradienten zwischen Tag und Nacht als vielmehr den jahreszeitlichen Schwankungen zwischen Sommer und Winter. In der kalten Jahreszeit auftretende Risse schlossen sich im Sommer wieder.

LOUIS VICAT⁷ untersuchte an seiner 1824 fertig gestellten massiven Gewölbebrücke in Souillac als einer der ersten das periodische Öffnen und Schließen der Fugen in Abhängigkeit von der Temperatur. Wenngleich diese Bewegungen zu einer Änderung des Schubes auf die Widerlager führen mussten, so wurden daraus doch keine Probleme für die Standsicherheit des Tragwerkes abgeleitet. [215/S.215f]

Mit der Einführung des Eisens für Brückenbauwerke gab es jedoch Bedenken bezüglich des Einflusses der Temperatur auf das Tragwerk, zum einen in Hinblick auf die Festigkeit des

⁷ LOUIS JOSEPH VICAT (1786-1861).

Materials⁸, zum anderen in Bezug auf die zu erwartenden Bewegungen und die daraus resultierenden Risiken für die Standsicherheit. Dass die Bedenken berechtigt waren, zeigten frühe Schäden an den wenigen bereits errichteten eisernen Brücken. Zum Beispiel gab es an der 1796 errichteten Buildwas-Brücke über den Severn ständig Probleme durch Temperaturbewegungen an den eisernen Bögen [174/S.159], und an dem 1803 vollendeten Pont des arts in Paris wurden ganze Steine durch die Verlängerung der eisernen Stäbe vom Platze gerückt [233/S.470]. Die Brückenbauer wurden vorsichtig⁹.

Wenngleich JOHN RENNIE D.Ä.¹⁰ für die über 200 ft (73 m und 2 x 64 m) spannenden gusseisernen Bögen der Southwark-Brücke (1813-19) noch keine direkten Vorkehrungen für den Ausgleich von Temperaturverformungen traf, so untersuchte sein Sohn¹¹ schon in der Bauphase akribisch den Effekt der Temperatur auf die Bögen¹². Bei 25 K Temperaturerhöhung hob sich der Bogenscheitel um 31 mm [215/S.216]. Ein Versuch, das gesamte Tragwerk zur Unterbindung der Temperaturbewegungen zwischen die Pfeiler zu keilen, endete mit dem Bruch des Widerlagermauerwerks, das daraufhin erneuert werden musste [174/S.178]. Später sollte es auf Grund der periodischen Bewegungen der Bögen immer wieder Ärger mit dem Belag von Straße und Fußweg geben [633/S.584], Gefahren für die Sicherheit der Bögen und Widerlager sah RENNIE aber offenbar nicht [215/S.216] – oder doch...?

4.2.2 Die Lösung: Beweglichkeit

Zumindest suchte er kurz nach Fertigstellung der Southwark-Brücke für eine nur 80 ft (24 m) spannende Aire-Überführung in Leeds nach anderen Lösungen. Seine beiden Vorschläge im Juli 1820 – eine Ketten- und eine Bogen-Zugband-Brücke – waren jeweils so konstruiert, dass sich die aus Temperaturwechsel resultierenden Längenänderungen des Überbaus nicht auf die Auflagerkräfte auswirkten¹³. Die Beweglichkeit der Tragglieder sollte durch “moveable sectors” – bewegliche Bereiche – gewährleistet werden [226/S.227]. Woran dachte RENNIE konkret – an Gleitlager? Solche wären jedoch nicht neu gewesen.

⁸ Siehe dazu in [141], [145/S.26].

⁹ Noch zur Mitte des 19. Jahrhunderts waren es unter anderem Bedenken bezüglich der Ausdehnung und Zusammenziehung des Eisens unter Temperaturwechsel, die Eisen als Baumaterial für die großen Talbrücken über die Göltzsch und Elster in Sachsen ausscheiden ließen [247/S.385f].

¹⁰ JOHN RENNIE DER ÄLTERE (1761-1821).

¹¹ JOHN RENNIE DER JÜNGERE (1794-1874).

¹² Für Details dazu siehe in [143/S.176], [227/S.133].

¹³ „[...] the expansion and contraction are wholly independent of any action on the abutments [...] which are intended to support the perpendicular weight of the superstructure only“ [226/S.227].

Im August desselben Jahres vollendete RALPH DODD¹⁴ den Bau einer nur 30 ft (9 m) weiten Brücke über die Chelmer bei Springfield – der Fachwelt als die schönste jemals im Königreich und darüber hinaus errichtete Brücke vorgestellt¹⁵. Auch aus konstruktiver Sicht blieb diese nicht unbeachtet. Schmiedeeiserne Bogen-Zugband-Binder ruhten allein auf in das Ufer gerammten, röhrenförmigen Gussstützen, beides war vergleichsweise neu¹⁶. Neu waren auch die Rillen („grooves“) auf den Stützen, die dem Tragwerk die Möglichkeit zum Ausdehnen und Zusammenziehen geben sollten¹⁷. Offenbar wurde damit an der Chelmer-Brücke das erste Mal die Idee eines Gleitlagers ausgesprochen und auch verwirklicht. Leider war der Überbau maßlos unterdimensioniert und musste bereits kurz nach der Fertigstellung zusätzlich gestützt und bald erneuert werden [172/S.70]. Dennoch wies sie neue Wege für den Brückenbau, auch bezüglich des Umgangs mit den aus Temperaturänderungen zu erwartenden Belastungen für das Tragwerk. Während RENNIE seine Southwark-Brücke noch fest zwischen die massiven Pfeiler zu spannen versuchte und sich entsprechende Sicherheiten mit sehr viel verbauter Masse erkaufte, legte DODD das Tragwerk frei auf und ließ es „atmen“ – ein Ansatz, der sich schließlich im Brückenbau durchsetzen sollte. Ein Paradigmenwechsel kündigte sich an – mehr Sicherheit durch mehr Beweglichkeit [196/S.9].

4.2.3 Die Methode: Brückenlager

Für größere Spannweiten sollten im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts noch die Bogenbrücken den Eisenbrückenbau dominieren. Durch neue konstruktive Details wurde dem Bauwerk zunehmend mehr Beweglichkeit zugestanden. 1822 erhielt MOXON¹⁸ ein Patent auf die „Verbesserung im Baue der Brücken und ähnlicher Gebäude“. Laut Patentschrift – ohne Zeichnung¹⁹ schwer nachzuvollziehen – sollten seine Brückenbögen offenbar aus verklammerten, ineinander gesteckten Rippen bestehen, „[...] die den abwechselnden Ausdehnungen und Zusammenziehungen bei dem Wechsel der Temperatur weniger unterworfen [...]“ sind [214/S.349]. Die Gebrüder LEATHER²⁰ führten ab Mitte der 1820er Jahre spezielle Lager ein – im Bogenbrückenbau allgemein als „Gelenk“ bezeichnet [196]. Bei mehrfeldrigen

¹⁴ RALPH DODD (ca.1756-1822).

¹⁵ „[...] the most beautiful ever erected in this kingdom, or probably any other [...]“ [148/S.236].

¹⁶ Zur Brücke siehe in den Veröffentlichungen von J.G. JAMES in [172/S.70], [170/S.169], [174/S.179].

¹⁷ “[...] grooves in the top of those iron columns, on which the whole bridge has room to contract or expand, so necessary in this climate, from the various changes of the atmosphere from heat to cold, as the other iron bridges have suffered materially from the want of this precaution” [148/S.236].

¹⁸ JOH. DOWELL MOXON (dem Verfasser sind keine Lebensdaten bekannt).

¹⁹ Der angegebenen Quelle lag keine Zeichnung bei.

²⁰ LEATHER, GEORGE (1787-1870); LEATHER, JOHN (dem Verfasser sind keine Lebensdaten bekannt).

Tragwerken, z.B. bei der 1832 vollendeten Dunham-Brücke²¹, trennten sie die einzelnen Überbauten jeweils konstruktiv, so dass diese unabhängig auf Temperaturveränderungen reagieren konnten (Abb. 5). Schon 1827 hatte RENDEL²² mit Langlöchern an der von ihm erbauten Brücke über die Lary²³ den Bogenüberbau von den Pfeilerständen getrennt, um Ausdehnen und Zusammenziehen des Tragwerks zu erlauben [225/S.101]. Mit diesen neuen konstruktiven Lösungen waren um 1830 die Weichen gestellt, dem Bogenbrückenbau in Eisen bei Verträglichkeit mit Temperaturänderungen neue Dimensionen zu eröffnen²⁴.



Abb. 5: Dunham-Gelenkbogenbrücke; Links: Ansicht, Rechts: Lagerdetail [195]

Ähnlich innovativ waren die Ingenieure beim Bau von Hängebrücken. Solche kamen seit je zur Anwendung, wenn Tragwerke aus Holz, Stein – später auch Gusseisen – auf Grund der großen Spannweite oder anderer örtlicher Bedingungen zu teuer oder schlichtweg unmöglich schienen. Im frühen 19. Jahrhundert entstanden Ketten- und Drahtbrücken mit immer größerer Spannweite, die letztlich zur Einführung spezieller Lagersättel auf den in der Regel gemauerten Pylonen führten. Ausschlaggebend dafür war insbesondere die sich ändernde Form der Hängegurte bei wechselnder Belastung. Durch die Lagersättel sollten die Hängegurte jederzeit die der Belastung entsprechende Form annehmen können, ohne dabei nennenswerte Horizontalkräfte in die Pylonspitze einzuleiten. Abb. 6 zeigt Anwendungen an ausgewählten Hängebrücken des frühen 19. Jahrhunderts, deren konstruktive Ausbildung Vorbild für die später typischen Lager gewöhnlicher Balkenbrücken werden sollte.

²¹ Über den Fluss Trent nördlich von Nottingham.

²² JAMES MEADOWS RENDEL (1799-1856).

²³ In der Nähe von Plymouth, Südwest-England.

²⁴ Insgesamt überrascht es, wie früh das Problem der Temperaturexpansion auch theoretisch behandelt wurde. REICHENBACH gibt bei der Vorstellung seines Brückensystems in *Theorie der Brückenbögen und Vorschläge zu eisernen Brücken in jeder beliebigen Größe* schon 1811 Hinweise, wie durch geschickte konstruktive Durchbildung der Fahrbahnaufständigung größere Temperaturspannungen verhindert werden können. Er betont darüber hinaus bereits die Vorteile weicher gegenüber starrer Konstruktionen [205/S.301ff]. Für den Entwurf der gusseisernen Bergues-Brücke berechnet DUFOUR bereits 1829 eine Temperaturexpansion von 3,8 mm für die 19 m spannenden Bögen; [554/S.193].

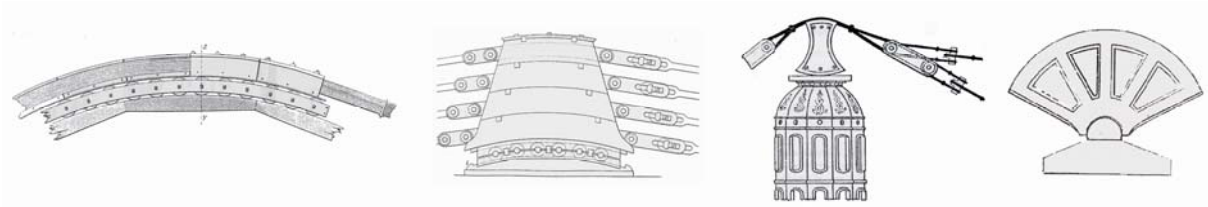


Abb. 6: Ausgewählte Lagersättel von Hängebrücken des frühen 19. Jahrhunderts: Von links nach rechts: Dordogne-Brücke 1827-28, Menai-Brücke 1819-26, Cubzac-Brücke 1827-29; [205], Charente-Brücke [223]

4.3 Entwicklung einer Technologie – am Beispiel der Lager für Balkenbrücken

Bei den Balkenbrücken hatte es ähnliche Innovationen noch nicht gegeben. Die Spannweiten waren allgemein zu klein und nach wie vor von Holz oder gusseisernen Balken überspannt, für die sich die schon erwähnten hölzernen Schwellen bestens bewährten. Noch um 1860 werden die Vorteile hölzerner Auflager für eiserne Träger in der Fachliteratur gelobt:

„Was die Holzunterlage betrifft, so würde diese, wenn man sie von Eichenholz herstellt, jedenfalls die beste Unterlage für die Barrenenden sein, wenn nur das Holz im Allgemeinen eine größere Dauer hätte, indem eine solche Holzunterlage, vermöge ihrer Elasticität, den sanftesten Uebergang von der Straße oder Eisenbahn auf die Brücke gestattet“ [215/S.11].

Aus dieser Zeit erhaltene Beispiele von Brücken mit hölzernen Lagern sind extrem selten geworden und finden sich oft nur durch Zufall, wie an der um 1870 gebauten Malxebrücke vor den Toren von Cottbus (Abb. 7).

Seit den 1840er-Jahren begannen sich jedoch die Bedingungen für die Lagerung balkenförmiger Brücken signifikant zu ändern. Die Etablierung des Puddelstahls als Konstruktionsmaterial sowie die Einführung neuer Trägersysteme ermöglichten größere Spannweiten, wodurch sich die Belastung für die beliebten Holzschwellen erhöhte. Diese drückten sich immer mehr ein, der so entstandene Höhenunterschied vergrößerte wiederum die Stöße beim Befahren der Brücken. Holzschwellen konnten diese Kräfte nicht mehr absorbieren, und es war teuer, sie ständig auszutauschen. Die Unterzüge größerer Brückenträger legte man zunehmend direkt auf gusseiserne Unterlagsplatten. Es begann die Entwicklung einer neuen Lagergeneration für Balkenbrücken, die Generation der gusseisernen – später stählernen – Lager.



Abb. 7: Malxebrücke Peitz-Luisenruh; Links: Ansicht, Mitte/Rechts: Hölzernes Auflager; [670]

4.3.1 Flächenlager

Die erste Form eiserner Brückenlager waren Flächenlager. Ober- und Unterteil der Lager berührten sich hier flächig in einer Ebene oder – im Falle zwischen gelegter Lagerwalzen – blieben im planparallelen Abstand. Wenngleich das Problem der Materialausdehnung aus Erfahrungen beim Bau von Bogen- oder Hängebrücken bekannt war, so setzte sich die Erkenntnis, bewegliche Lager auch für Balkenbrücken zu verwenden, erst allmählich durch. Noch in der Tradition alter Denkmuster wurden anfänglich oft sämtliche Träger einer Brücke mit Lagerplatte und Unterbau fest verankert. Als Beispiel sei hier die erste große und viel publizierte Gitterträgerbrücke – die Royalkanal-Brücke bei Dublin von 1845 – erwähnt, deren 140 ft (42 m) spannende Träger beidseitig zur Erhöhung der Tragfähigkeit praktisch eingespannt worden waren [221/S.2] (Abb. 8). Die Auswirkungen von Temperaturveränderungen auf das Tragwerk wurden vielfach noch unterschätzt oder ignoriert. Verformungen des Tragwerks und Risse im Mauerwerk der Auflager waren allgemein die Folge [108/S.247].

Hinweise auf gebaute Gleitlager häufen sich in der Literatur ab Mitte der 1840er-Jahre²⁵. Eine sehr frühe Anwendung von Rollenlagern erfolgte an der von RICHARD OSBORNE²⁶ wahrscheinlich 1847 im Zuge der Waterford & Limerick Railway (Irland) errichteten Ballysimon-Brücke²⁷ (Abb. 8). Zu den ganz frühen verwirklichten Rollenlagern zählen sicherlich auch die der beiden Eisenbahnbrücken über die Commercial-Road und über den Regentskanal, beide 1848 nach demselben Plan erbaut, die KARL CULMANN²⁸ während seiner Studienreise 1849/50 besichtigte – vgl. hierzu Abb. 95, S. 155:

„Der Horizontalschub des Bogens wird durch eine Kette aufgehoben [...] seine Enden ruhen auf zwei gusseisernen Platten, wovon die eine auf Walzen läuft, um die Längenänderungen in Folge Temperaturwechsels zu gestatten“ [135/S.197]²⁹.

²⁵ Z. B. notierte LENTZE³¹ auf einer Studienreise 1844/45 zur schmiedeeisernen „rigiden“ Brücke „zu Aubervilliers über den Kanal von St. Denis“: „Diese Träger ruhen frei auf ihren äußersten Punkten, ohne an Widerlager sich zu lehnen. Die Ausdehnung des Eisens, in Folge der Temperaturwechsel, ist gestattet, indem die Endstäbe der Träger in einer Spur von ausreichender Länge stehen“ [192/S.102].

Die Encyclopaedia Britannica beschreibt im Abschnitt „Iron Bridges“ im Detail gleich mehrere Brücken. Im Zusammenhang dieser Arbeit sind die Ausführungen zur High-Level-Brücke in Newcastle-upon-Tyne (eröffnet 1849) von Interesse: „On the abutments all the bearings are allowed to expand and contract, but on the next bearings they are fixed down firmly [...]; on the next pier again they are free, and so on alternately fixed and free. There are no rollers, but the bearings have sliding surfaces provided for the purpose“ [633/S.605].

²⁶ RICHARD BOYSE OSBORNE (1815-1899).

²⁷ Zum Kontext der Brücke siehe [167]. Dort wird die Ballysimon-Brücke auf ca. 1850 datiert. Aus einem Brief OSBORNE an die „Commission appointed to inquire into the application of iron for railway structures“ lässt sich jedoch schließen, dass die Brücke bereits 1847 erbaut worden sein muss – siehe [220].

²⁸ KARL CULMANN (1821-1881).

²⁹ Zu diesen Brücken siehe auch [276], [277], [278/S.2], [281].

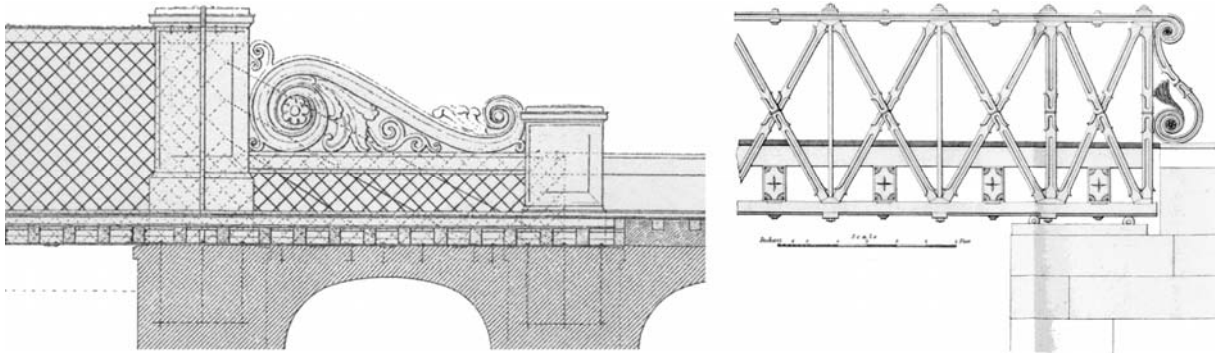


Abb. 8: Links: Royalkanal-Bücke Dublin, man beachte die angedeutete Rückverankerung der Gitterwände [221], Rechts: Ballysimon-Brücke, auf Rollen gelagert [220]

Das Prinzip der Rollenlager war nicht neu und im Brückenbau von den Lagersätteln der Hängebrücken her bekannt. Je größer die Brücke, desto mehr Rollen – oft auch „Walzen“ genannt – wurden untergelegt. Die Elastizität des Holzes wirkte bei Bedarf ergänzend, sowohl als „Stoßdämpfer“ als auch um geringe Formänderungen der Trägerenden zu erlauben. Die wohl aufwändigsten jemals gebauten beweglichen Flächenlager finden sich bei ROBERT STEPHENSONS³⁰ Conway-Brücke und Britannia-Brücke, eröffnet 1848 bzw. 1850. Nicht nur die Größe der Lager war außergewöhnlich, sondern auch die zusätzliche Aufhängung des Obergurtes auf beidseitigen Reihen mit „kanonenmetallenen“ Kugeln [252/S.191] (Abb. 9).

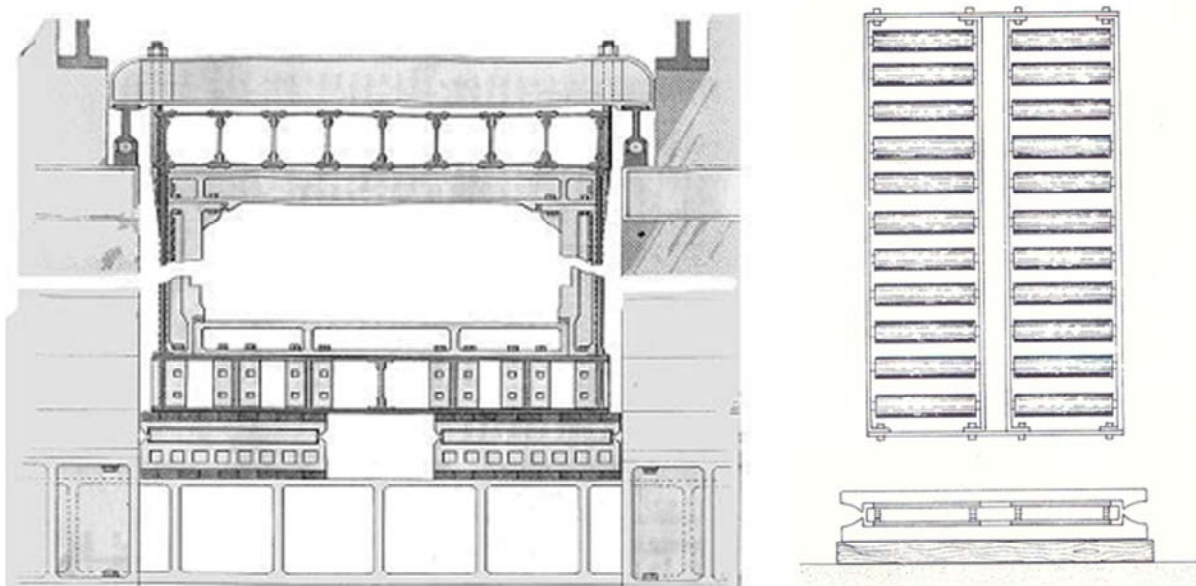


Abb. 9: Lager der Britannia-Brücke; Links: Schnitt [215]; Rechts: Anordnung der unteren Wälzkörper [492]

³⁰ ROBERT STEPHENSON (1803-1859).

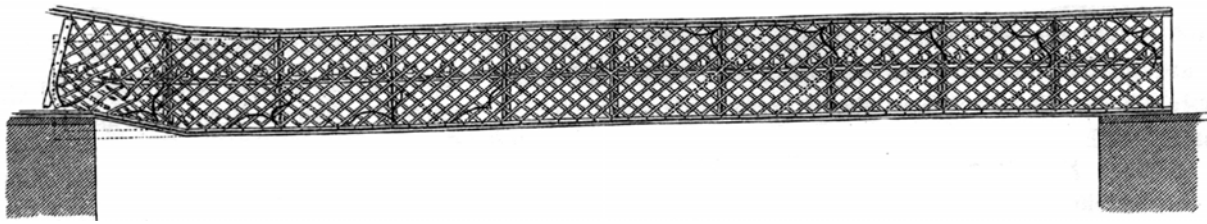


Abb. 10: Schädigung eines Gitterträgers durch Verschiebung des Auflagerpunktes bei Flächenauftragung [135]

Ein ganz wesentlicher Mangel der Flächenlager zeigte sich bei Verformungen des Überbaus. Die Auflagerfläche reduzierte sich dann auf einen kleinen Bereich an der vorderen Auflagerkante. Nicht nur die Statik von Unterbau und Lager wurden damit beeinflusst, sondern je nach Träger auch deren Tragfähigkeit (Abb. 10).

Das Problem war bekannt, allein die Lösungen waren unterschiedlich. CARL LENTZE³¹ zum Beispiel diskutierte es 1855 für seine im Bau befindlichen Gitterträgerbrücken bei Dirschau und Marienburg. An den Mittelauglern vertraute LENTZE wegen der vergleichsweise geringen Formänderungen des Durchlaufträgers auf die Elastizität(!) der gusseisernen Lagerplatten. An den diesbezüglich stärker beanspruchten Endauflagern schlug er hölzerne Schwellen als Zwischenlage vor [193/S.454]. Der geringen Haltbarkeit des Holzes wegen wurden jedoch Stahlfedern³² eingebaut [280/S.747] (Abb. 11).

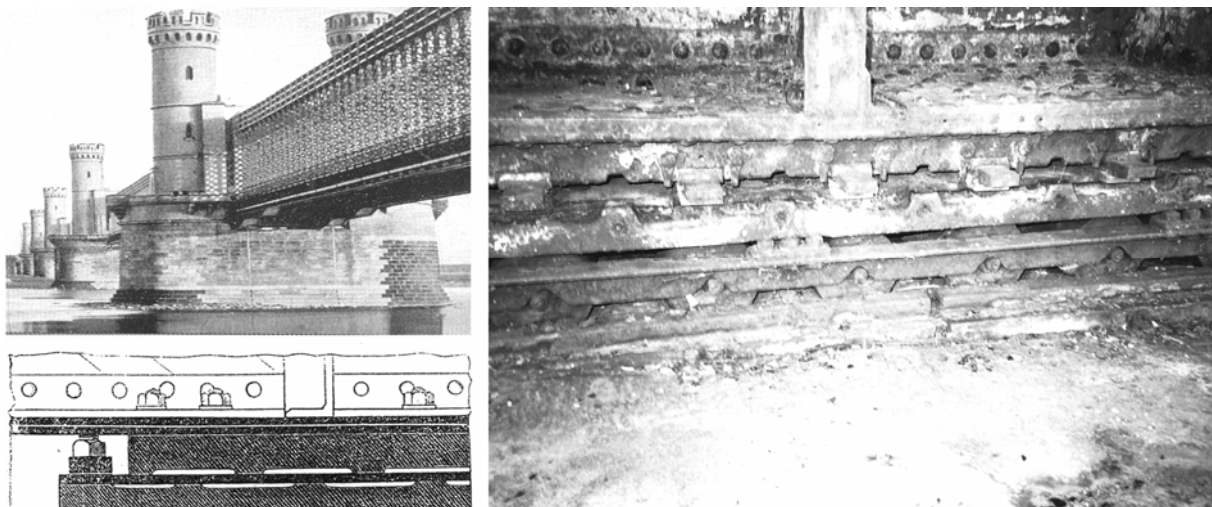


Abb. 11: Erste Weichselbrücke Dirschau; Links: Ansicht [224] und Prinzip des Federlagers [108], Rechts: Detail des beweglichen Auflagers; Oberhalb der Walzenlage befindet sich die eingebaute Blattfeder [670]

³¹ CARL LENTZE (1801-1883).

³² Der Einbau von Stahlfedern greift im Prinzip die Idee der elastischen Lagerung auf, wie sie sich im 20. Jahrhundert mit dem Einsatz der Verformungslager durchsetzen sollte – vgl. Abschnitt 4.3.4. Beschreibungen der Stahlfedern finden sich zum Beispiel in [108/S.264], [149 /S.193f], [168/S.168f].

Anders war die Idee bei einer weiteren Großbrücke jener Zeit, der Kölner Dombrücke (1856-60). Hier sollten die Endauflager so justiert werden, dass die der Öffnung zugewandten Rollen unter Eigengewicht frei lagen und sich erst bei weiterer Durchbiegung des Überbaus unter Verkehr am Lastabtrag beteiligten [209/S.347]. Aber das blieben Versuche, den gewachsenen Ansprüchen des Tragwerks mit einer inzwischen überholten Lagertechnik zu begegnen. Dem Streben der Ingenieure nach konstruktiver Klarheit konnten die herkömmlichen Flächenlager nicht mehr genügen.

Auch der Ort des Geschehens wechselte. Großbritannien verlor zur Jahrhundertmitte seine Vormachtstellung im Brückenbau. Vor allem bezüglich der theoretischen Grundlagen und konstruktiven Durchbildung der Brückenträger sollten die Impulse bald aus Deutschland kommen – vgl. dazu Abschnitt 5.1.

4.3.2 Kipplager

Kipplager ermöglichten die Durchbiegung des Überbaus. Zwei unterschiedliche Lösungen bestimmten dabei die Lagertechnik, die Zapfen- und die Berührungs-Kipplager. Letztere erlaubten unter anderem die Herstellung eines einfachen Kipp-Gleitlagers, wie es früh schon zum Beispiel für Brücken der Hessischen Ludwigsbahn³³ dokumentiert ist [236/Taf.XXI]. Bei diesen Lagern, die vornehmlich für kleine Brücken verwendet wurden, ermöglichte eine schlichte gewölbte Lagerplatte in einfachster Form sowohl die Translation als auch die Rotation des Überbaus (Abb. 12). Diese Lager jedoch bildeten für Bauwerke mittlerer und großer Spannweite keine geeignete Alternative. Hierfür sollte eine Lagertechnik heranreifen, bei der Translation und Rotation durch separate Funktionseinheiten realisiert wurden. Diese vielmehr „typischen“ Zapfen- und Berührungs-Kipplager bestimmten bis zum Ende des Untersuchungszeitraums und noch darüber hinaus die Brückenbaupraxis.

Die Zapfen-Kipplager hatten ihren Ursprung in Gelenkbolzenbrücken, bei denen zur Verringerung der Nebenspannungen die Konstruktion als Ganzes oder in Teilen mit Bolzenknoten gekoppelt wurde. Da lag es nahe, den Endbolzen des Trägers gleichzeitig als Kippbolzen für das Auflager zu nutzen [57/S.2]. Kipplager dieser Art fanden sich gepaart mit einem Gleitteil zum Beispiel am Crumlin-Viaduct (1853-57) in Süd-Wales [199/S.28] oder mit Rollen an der Günz-Brücke bei Günzburg von 1853 [204/S.56], der vielleicht ersten Anwendung von Rollenlagern im Brückenbau in Deutschland (Abb. 12).

³³ Mit dem Bau der ersten Teilstrecke wurde 1848 begonnen – noch als Mainz-Ludwigshafener-Eisenbahngesellschaft, später jedoch umbenannt in Hessische-Ludwigs-Eisenbahngesellschaft.

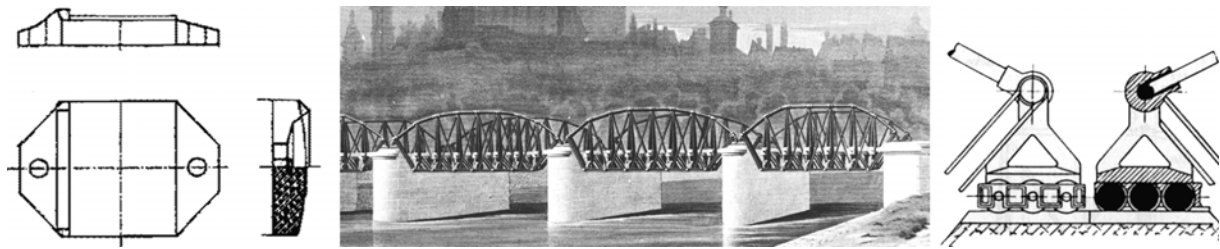


Abb. 12: Links: Linienkipplager der Hessischen Ludwigsbahn [236], Mitte/Rechts: Günzbrücke – Ansicht [560] und Lagerdetail [204]

Als man später zu genieteten Fachwerkknoten überging, hatten sich die Bolzen als Lagerdetail fest etabliert und fanden sich als Drehpunkt bei den so genannten Zapfen-Kipplagern wieder. In Anlehnung an die Zapfenform wurden diese Lager schon von zeitgenössischen Autoren oft als Zylinderzapfen-Kipplager bezeichnet. Abb. 13 veranschaulicht typische Ausbildungen solcher Lager, sowohl mit Voll- als auch vereinfacht mit Halbzapfen.

Es war offenbar JOHANN WILHELM SCHWEDLER³⁴, der die Zapfen-Kipplager in die Brückenbaupraxis einführte, erstmals angewandt wahrscheinlich an der Brahe-Gelenkbolzenbrücke bei Czersk (1861) in Form von Halbzapfen [248/S.599]. Das Prinzip des Halbzapfen-Kipplagers hatte AUGUST WÖHLER³⁵ bereits 1855 in der *Zeitschrift für Bauwesen* als „kreisförmiges Auflager“ vorgestellt und die Vorteile gegenüber herkömmlichen Flächenlagerungen beschrieben [360/S.140] (Abb. 13). Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich SCHWEDLER für seine Lager in Czersk an WÖHLERS Ausführungen orientierte. Zapfen-Kipplager sollten im Brückenbau bis weit ins 20. Jahrhundert hinein Anwendung finden. Beispiele von Lagern mit Vollzapfen finden sich noch genügend, die Halbzapfen-Kipplager sind jedoch inzwischen rar geworden. Abb. 14 zeigt ein Exemplar der 1876 fertig gestellten und jüngst sanierten Most Mieszcząński – der früheren Wilhelmsbrücke – in Wrocław.

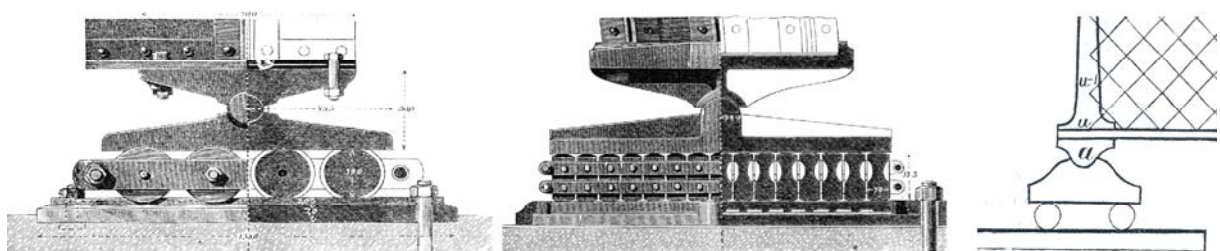


Abb. 13: Typische Zapfen-Kipplager; Links: mit Vollzapfen, Mitte: vereinfacht mit Halbzapfen [108], Rechts: Vorschlag WÖHLERS für ein Kipplager [360]

³⁴ JOHANN WILHELM SCHWEDLER (1823-1892).

³⁵ AUGUST WÖHLER (1819-1914).

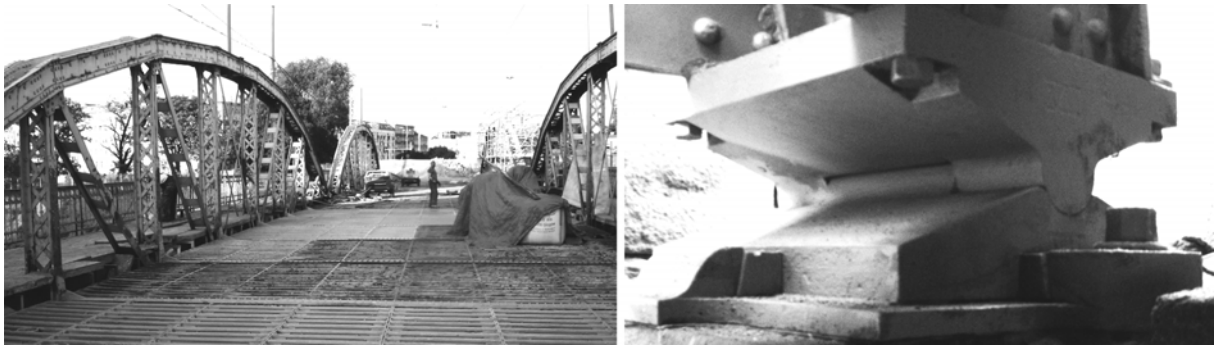


Abb. 14: Most Mieszcański; Links: Brücke während der Grundsanierung 2009, Rechts: Lagerdetail; man beachte das Ineinandergreifen der beiden Lagerhälften zur Verhinderung einer Querverschiebung; [670]

Mit größer werdenden Tragwerken erhöhte sich aber auch die Zapfenreibung und damit die Verschiebung des theoretischen Auflagerdrucks [204/S.87]. Sollte die Reibung verringert werden, erhielten Lagerober- und -unterteil unterschiedliche Radien. Die Kontaktfläche oder „Berührungs“-Fläche reduzierte sich so im unbelasteten Zustand theoretisch auf eine Linie. Gegenüber der für Zapfen-Kipplager typischen gleitenden Reibung der Flächen untereinander kam es nun zu wälzender Reibung, typisch für die Berührungs-Kipplager. Solche hatte LUDWIG WERDER³⁶ bereits bei der Großhesseloher Isarbrücke (1851-57) in vollkommener Weise ausgeführt. Er hatte auch die Vorteile von Stelzen gegenüber Rollen erkannt. Stelzen erlaubten bei gleicher Baulänge des Lagers eine größere Kontaktfläche für den Lasttransfer vom Über- in den Unterbau der Brücke, denn es ließ sich die Anzahl der Wälzkörper gegenüber der Verwendung von Rollen durch den Verzicht auf „totes“ Material erhöhen (Abb. 15).



Abb. 15: Isarbrücke Großhesselohe; Links: Ansicht [676], Mitte: Nach dem Abriss der Brücke gesicherte Auflagereinheit [678], Rechts: Prinzip der Berührungs-Kipplager: In der Berührungsfläche des Kippteils wälzen unterschiedlich gekrümmte Flächen aufeinander ab [108]

³⁶ JOHANN LUDWIG WERDER (1808-1885).

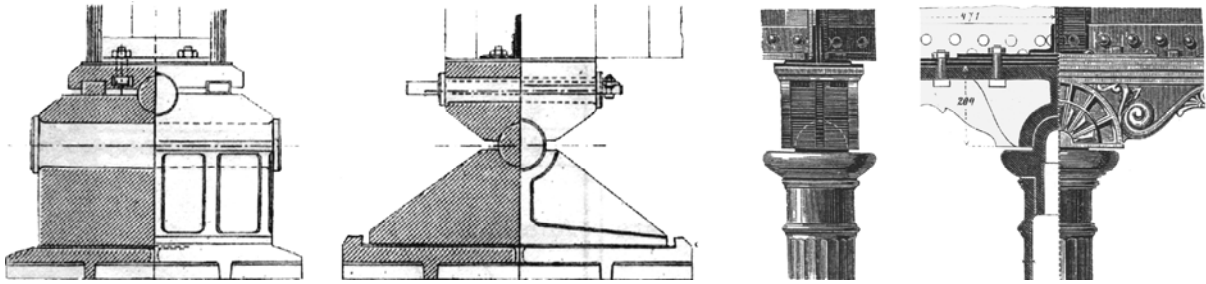


Abb. 16: Links: Lager der Moselbrücke bei Bullay [251], Rechts: Stützenkopf der Halle-Gubener Eisenbahn [108]

Mit der zur Verfügung stehenden Lagertechnik schienen sowohl Temperaturbewegung wie auch zwängungsarme Trägerdurchbiegung zufrieden stellend gewährleistet. Doch die Überbauten wurden nicht nur immer länger, sondern auch breiter. Zweispurige Tragwerke waren bald zur Regel geworden. Es konnten Temperaturbewegungen und Durchbiegungen in Brückenquerrichtung nicht länger vernachlässigt werden.

An der Moselbrücke bei Bullay (1876-78) zum Beispiel ermöglichte ein zusätzlicher Zapfen die Querdurchbiegung, wenngleich planmäßig nur für den Bauzustand. Konsequenter waren diesbezüglich die Kugelzapfen-Kipplager, wo die Kugelform des Zapfens allseitige Überbauverdreherungen dauerhaft erlauben sollte. Frühe Lager dieser Art – in diesem Fall Kugel-Halbzapfen-Kipplager (vgl. dazu Abschnitt 5.2) – sind für die Bauten der 1871 eröffneten Halle-Sorau-Gubener-Eisenbahn dokumentiert [108/S.298] (Abb. 16).

Die für diese Lager so typische zweite Stelzen- oder Walzenreihe zur Berücksichtigung der Querausdehnung des Überbaus wurde vermutlich erstmals an der zweiten Weichselbrücke bei Dirschau (1889-91) verwirklicht³⁷ (Abb. 83, S. 117). Dadurch vergrößerten sich aber die ohnehin schon wuchtigen Lagerkörper. CLAUS KÖPKE³⁸ begegnete diesem Problem am „Blauen Wunder“ in Dresden (1891-93) durch nur eine – aber diagonal gelegte – Walzenlage. [204/S.87]. KÖPKES Lager waren Punkt-Kipplager. Solche hatten sich durch Verwendung ungleicher Radien für die Schalen aus den Kugelzapfen-Kipplagern entwickelt und gestatteten eine zwängungsarme allseitige Überbauverdreherung. Das Prinzip wurde 1889 in [62] von JOHN LABES³⁹ vorgestellt, dem ausgeführte Beispiele aber noch nicht bekannt waren. Damit dürften die Punkt-Kipplager am „Blauen Wunder“ in Dresden zu den frühesten ihrer Art zählen (Abb. 17).

³⁷ Dazu in [157/S.334], [509/S.57], [228/S.567].

³⁸ CLAUS KÖPKE (1831-1911).

³⁹ JOHN LABES (1851-1919).

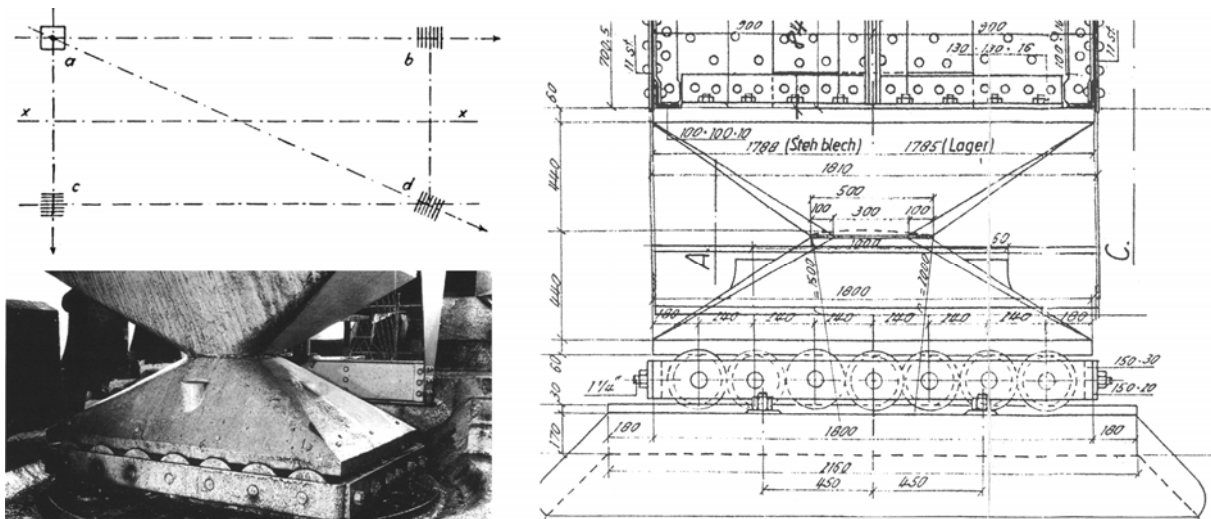


Abb. 17: Pylonlager der Elbebrücke „Blaues Wunder“; Links: Ansicht [164] und Ausrichtung der Lager im Gesamtsystem [204], Rechts: Konstruktionszeichnung; man beachte die unterschiedlichen Radien für die Berührungsflächen im Kippunkt, womit sich dieser im unbelasteten Zustand theoretisch auf einen Punkt reduziert [644]

Mit den Punkt-Kipplagern war die Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlager zum ausgehenden 19. Jahrhundert prinzipiell abgeschlossen. Arbeiten nach 1900 beschäftigten sich mit Details, um Unzulänglichkeiten der etablierten Lagertechnik zu beheben. Hier seien exemplarisch Lösungen KARL BERNHARDS⁴⁰ genannt, deren Anwendung offenbar jedoch auf die von ihm selbst entworfenen Brücken begrenzt blieb.

Ein Beispiel sind die an der Stubenrauchbrücke (1907-08) in Berlin-Niederschöneweide eingebauten beweglichen Lager des Hauptbogens (Abb. 18). Lager dieser Art hatte sich BERNHARD 1901 patentieren lassen (K9 - 7). Damit sollte der Gefahr des Umkippen des gesamten Stelzensatzes vorgebeugt werden. Die Kippgefahr der „klassischen“ Stelzenlager hatte dazu geführt, dass bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert zunehmend wieder Lager mit ganzen Rollen verwendet worden waren.



Abb. 18: Stubenrauchbrücke Berlin; Links: Ansicht [123], Rechts: Lagerdetail [126]

⁴⁰ KARL BERNHARD (1859-1937).

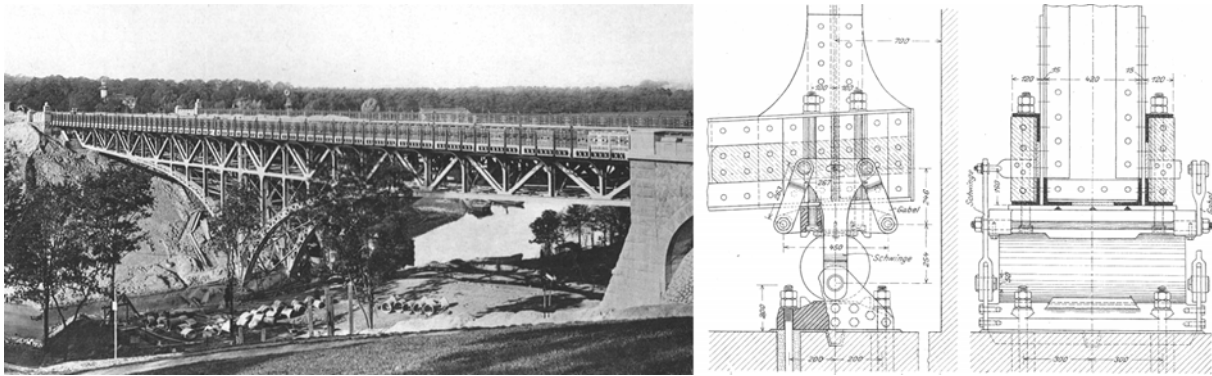


Abb. 19: Stößenseebrücke Berlin; Links: Ansicht, Rechts: Lagerdetail; [125]

Ein weiteres Beispiel gibt die Berliner Stößenseebrücke (1908-09). An den beweglich gelagerten Enden benutzte BERNHARD gegen Abheben gesicherte Lager, bei denen obere und untere Lagerplatte durch eine – laut BERNHARD – „Gelenkgeradföhrung“ so miteinander verbunden wurden, dass die Verankerung nirgendwo die parallele Bewegung der angrenzenden Lagerteile störte [126/S.349] (Abb. 19). Auch diese Form der Auflagerung hatte sich BERNHARD als *Bewegliches Lager für Brücken und ähnliche Bauwerke* zuvor patentieren lassen (K9 - 9). Laut BERNHARD hatten sich die im Falle abhebender Kräfte üblicherweise angebrachten Ankerstangen aus vielen Gründen nicht bewährt [587/S.1]. Auch seine Vorrichtung sollte sich nicht etablieren, zumindest hat der Verfasser keine weiteren Anwendungen nachweisen können.

4.3.3 Zwischenlösungen

Alle Lager hatten einen Nachteil. Insbesondere zwei Walzenreihen verlangten beträchtliche Bauhöhen, was Mehrkosten in der Herstellung und zusätzliche Probleme bei der Übertragung der Windkräfte verursachte [204/S.87], außerdem bald aus ästhetischen Gründen vermieden werden sollte [83/S.629]. Für eine Reduzierung der Höhe lag nichts näher, als die Walzenreihen durch den geometrischen Grundkörper zu ersetzen, der Verschiebungen in alle Richtungen ermöglicht – die Kugel. Kugeln waren in der Lagertechnik jedoch nicht neu.

Schon die Auflager für die Röhren der Britannia-Brücke bestanden in Teilen aus Kugeln (Abb. 9, S.18), und um 1860 wurde für die Bow-Brücke (1859-62) im New Yorker Central Park ein ganzer Auflagerpfeiler auf Kanonenkugeln gestellt und die Ausdehnung des Überbaus an ungewöhnlicher Stelle vorgesehen (Abb. 20). 1883 bewarb das *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens* den „Weikum’schen Kugelapparat“, der wohl „[...] bei Brückenverschiebungen bis zum Maximalgewichte von 326 Tonnen seinen Zweck in der vorzüglichsten Weise erfüllte“ [151/S.259]. Auf Kugellager bei den sächsischen Staatseisenbahnen um 1900 wurde in [240/S.682] verwiesen, leider ohne Angabe eines konkreten Beispiels.

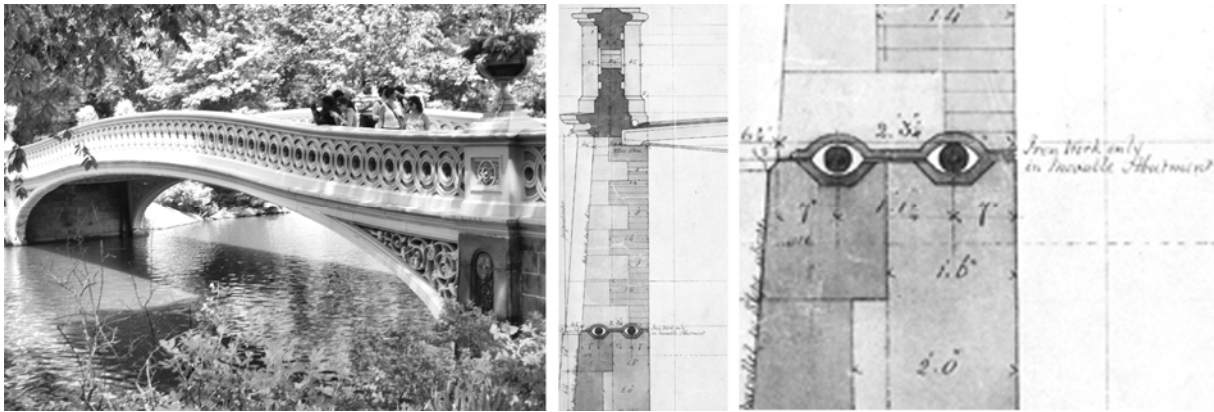


Abb. 20: Bow-Brücke; Links: Ansicht [685], Mitte: Schnitt durch den Auflagerpfeiler, die Ebene mit den Kugeln oberhalb des Wasserspiegels ist deutlich zu erkennen, Rechts: Vergrößerte Darstellung des relevanten Details aus der mittleren Abbildung; [641]

Die Idee beweglicher Kugellager im Brückenbau war also nicht mehr neu, als ROBERT SCHÖNHÖFER⁴¹ sie Mitte des letzten Jahrhunderts aufgriff und weiterentwickelte. 1940 schlug SCHÖNHÖFER ein Vielkugel-Lager vor, in welchem viele kleine Kugeln statt weniger Kugeln mit großen Durchmessern wie in früheren Anwendungen wirkten [83]⁴² (Abb. 21). Aus dem Vielkugel-Lager entwickelte SCHÖNHÖFER das Vielrollen-Lager mit Rollen kleinen Durchmessers, auch doppelreihig für eine allseitige Beweglichkeit [84]⁴³. Anfangs vermutlich nur wenig gebaut, sollten diese Lager in den 1960er-Jahren als „Nadellager“ in Kombination mit dem noch zu erwähnenden Gummi-Topflager eine weite Verbreitung finden [36/S.21].

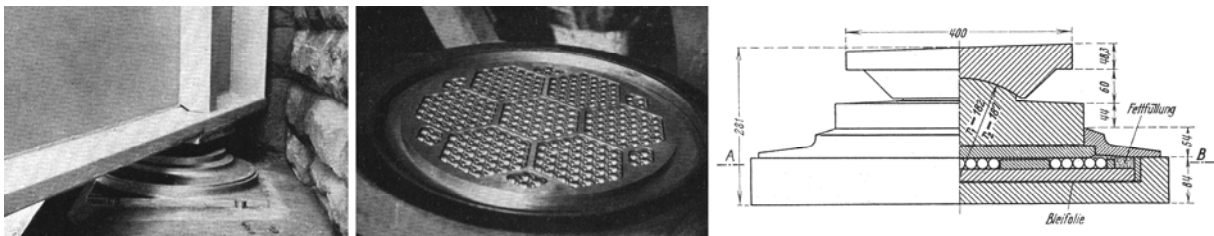


Abb. 21: SCHÖNHÖFERS Vielkugellager; Links: Einbauzustand, Mitte: Kugelanordnung, Rechts: Prinzipskizze; [83]

Mit der Vielzahl von kleinen Rollen bedeuteten SCHÖNHÖFERS Entwicklungen eine Abkehr von dem Bestreben, möglichst wenige, aber große Rollen zu verwenden [137/S.498]. Als es in Deutschland Anfang der 1920er-Jahre Versuche zur Normung von Brückenlagern gege-

⁴¹ ROBERT SCHÖNHÖFER (1878-1954).

⁴² Patentierte 1937 – siehe K9 - 19.

⁴³ Patentierte 1940 – siehe K9 - 19.

ben hatte, blieben Lager mit drei und mehr Rollen schon unberücksichtigt. Eine zuverlässige Bestimmung der Lastverteilung auf die Rollen war wegen der statischen Unbestimmtheit kaum möglich [457/S.357]. Als Grundform eines Rollenlagers sollte nur das Zweirollenlager normiert werden, darüber hinaus das Einrollenlager für kleinere Brücken und für Dachbinder. Einrollenlager stellen die einfachste Form beweglicher Brückenlager dar und ermöglichen bei geringer Bauhöhe einen definierten Lastabtrag, Längsverschiebungen und gleichzeitig Durchbiegungen des Überbaus. Auf Grund ihrer Einfachheit hatten Einrollenlager eine lange Tradition. Frühe stählerne Varianten wurden bereits in den 1880er-Jahren bei der Berliner Stadtbahn eingebaut [16/S.917]. Ab den 1930er-Jahren wurden sie als „gepanzerte Betonrollenlager“⁴⁴ angeboten [15/S.235] und ab ca. 1960 als „hochgezüchtete“ Lager mit Auftragschweißung oder aus Edelstahl [36/S.35ff] (Abb. 22). Die Edelstahllager führten allerdings zu einer Vielzahl von Schadensfällen, wodurch die Verdrängung der Wälzlagertechnik durch die neu entwickelten wartungsarmen und nachfolgend diskutierten Verformungslager beschleunigt wurde [82/Vorwort]. Interessanterweise finden sich Einrollenlager früh auch schon im Hochbau, zum Beispiel im Dach der Walhalla bei Regensburg, gebaut bis 1842, auf die im Abschnitt 4.4.2 näher eingegangen wird.

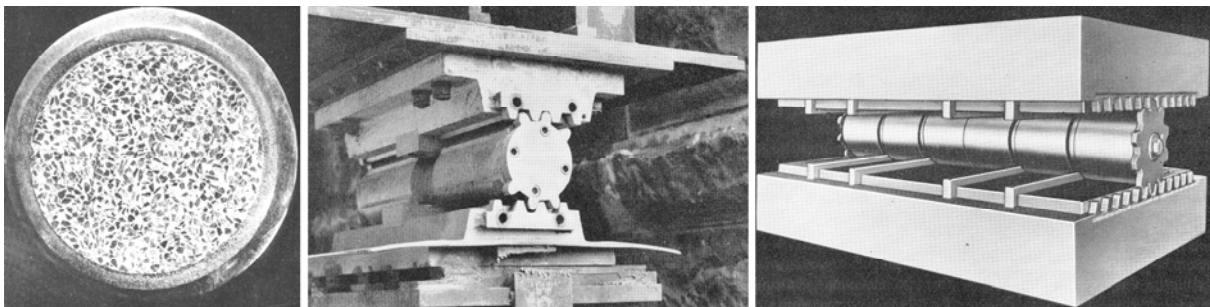


Abb. 22: Einrollenlager; Links: gepanzertes Betonrollenlager [15], Mitte: Lager mit Auftragschweißung, Rechts: Edelstahllager; [103]

4.3.4 Verformungslager

Im erweiterten Sinne sind schon ganze Brückenpfeiler als Verformungslager anzusehen, die auf Grund ihrer Höhe und Elastizität in der Lage sind, Bewegungen des Überbaus nachzugeben. In diesen Fällen sind Pfeiler und Überbau fest miteinander verbunden. Längenänderungen des Überbaus werden mehr oder weniger zwängungsfrei durch Verformungen der ganzen Pfeiler ausgeglichen. Im eigentlichen Sinne werden als Verformungslager jedoch

⁴⁴ Patentierte 1936 – siehe K9 - 17.

Bauteile bezeichnet, bei denen die geringe Eigensteifigkeit des Lagermaterials Relativbewegungen zwischen Über- und Unterbau durch Verformungen ausgleicht.

Als Verformungslager haben sich Gummilager – auch Elastomerlager genannt – durchgesetzt. Versuche mit Blei zum Ausgleich sich wiederholender Bewegungen bewährten sich nicht. Für „Einmal-Verformungen“ eignete sich Blei allerdings bestens und kam lange als Ausgleichsschicht zwischen Lagerplatte und Mauerwerk zur Vermittlung gleichmäßiger Auflagerpressungen zur Anwendung. Entsprechender Einsatz reicht weit zurück in die Lagertechnik des 19. Jahrhunderts.

Gummilager wurden aus Kautschuk hergestellt. Früh gab es Überlegungen, Kautschukplatten wegen ihrer schwingungsdämpfenden Eigenschaften als Stoßdämpfer einzusetzen. Schon die Schienen der Britannia- und der Conway-Brücke sollten zur Schwingungsdämpfung auf ca. 5 cm dicke Gummiplatten gelegt werden [274/S.461]. Nur kurze Zeit später, um 1853, bediente man sich der elastischen Eigenschaften des Kautschuks auch für Brückenlager, als bei der Saaleüberbrückung bei Grizehna ganz frühe Verformungslager entstanden:

„Die Hauptträger lagern auf [...] gußeisernen Sohlplatten [...]. Diese Platten ruhen auf Quadern festen Sandsteins der Brückenpfeiler und erhalten dabei, zur Vermittlung eines durchaus gleichmäßigen Auflagers und Druckes, jede eine ½ Zoll starke Unterlagplatte von vulkanisiertem Kautschuk, welche auch noch den Zweck erfüllen, sowohl die Trägerausdehnung durch die Temperatur zu vermitteln und auf die Quader-Unterlage unwirksam zu machen, als auch das durch Passieren der Bahnzüge veranlasste heftige Vibrieren des Eisenwerks zu vermindern“ [255/S.482].

Im „Jahrhundert des Eisens“ war offenbar aber noch kein Platz für Brückenlager aus Gummi. Erst 1936 griff VALLETTE, Chefingenieur der französischen Staatsbahnen [32/S.177], die Idee wieder auf und bewarb in den *Annales des Ponts et Chaussées* die Vorteile von Gummi in der Brückenlagertechnik [100/S.405ff]. 1958 bereits bestanden im Bereich der französischen Bahnen knapp 800 Bauwerke mit Lagern aus Gummiplatten. Die Entwicklung ging im Weiteren hin zur Nutzung des vollsynthetischen Chloroprene-Kautschuks „Neoprene“, der wesentlich alterungsbeständiger war als Naturkautschuk. Sie führte weiter vom reinen Gummilager zum bewehrten Gummilager, welches durch geeignete Zwischenlagen die Querkontraktion der weichen Gummimasse verhinderte [76/S.453]. Damit waren vergleichsweise dicke Gummiquader herstellbar, die bei Belastung nicht nennenswert nachgaben. EUGENE FREYSSINET⁴⁵ hatte sich dafür 1954 Zwischenlagen aus Bewehrungsmatten patentieren

⁴⁵ EUGENE FREYSSINET (1879-1962).

lassen⁴⁶. Die erfolgreichste Lösung jedoch waren Lager mit eingelegten und verklebten Blechplatten [36/S.15]. Aber trotz Querversteifung der Quader eigneten sich Gummilager bei üblichen Lagerabmessungen nur für den Abtrag vergleichsweise kleiner Lasten (Abb. 23).

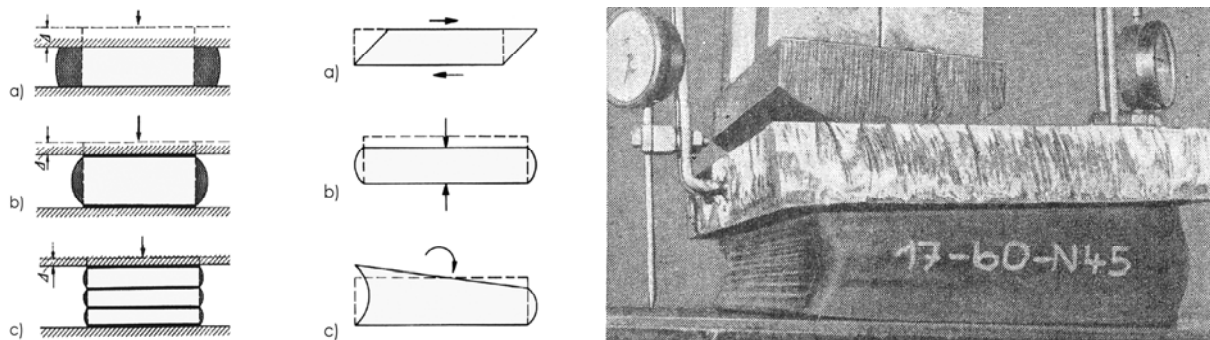


Abb. 23: Gummi- (Elastomer-) Lager; Links: Verhinderung der Querdehnung durch Zwischenlagen [96], Mitte: Mögliche Verformungen, nach [37], Rechts: Verformungslager im Prüfstand [48]

Die Anwendung des Gummis auch für schwere Lasten glückte durch Adaption des bekannten Sand-Topflagers. Die Idee war einfach und genial zugleich. Sand wurde durch Gummi ersetzt, der umschließende Topfrand verhinderte das seitliche Ausweichen des Gummis und die Materialeigenschaften des Gummis - wie Elastizität und Inkompressibilität - ergaben ein einfaches und dazu noch relativ billiges Verformungslager für große Lasten (Abb. 24)

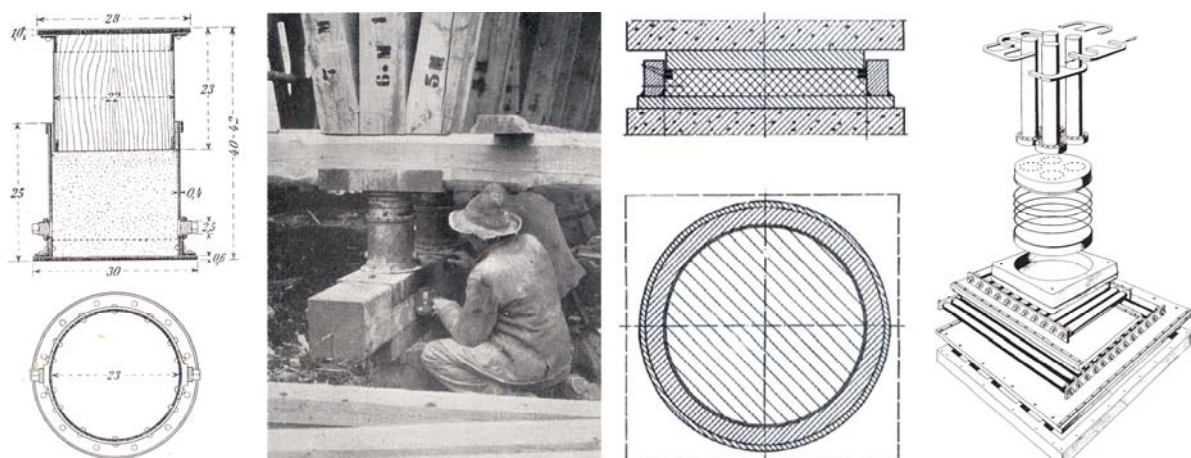


Abb. 24: Topflager; Von links nach rechts: Historischer Sandtopf [33], Sandentnahme zum Absenken eines Lehrgerüsts [547], frühes Gummmitopflager [10], Gummmitopflager kombiniert mit Nadellager [677]

⁴⁶ Nach Auskunft von JUPP GROTE, GUMBA, wusste FREYSSINET wahrscheinlich nichts von VALETES Bericht in den *Annales de Ponts et Chaussées*, der FREYSSINETS Patentanspruch gewissermaßen vorwegnahm [647]. Interessanterweise wurde in Frankreich schon 1920 ein Patent für elastische Auflager erteilt – siehe K9 - 35.

Im Gegensatz zu den erstgenannten Gummilagern ließen Gummi-Topflager aber nur Verformungen des Überbaus im Sinne von Kippungen zu, also keine Längs- oder Querverschiebungen. Dafür musste es mit entsprechenden Gleit- oder Rollelementen kombiniert werden, zum Beispiel mit SCHÖNHÖFERS Nadellager (Abb. 24).

Der entscheidende Vorteil der Verformungslager lag in dem flächigen Lasttransfer in den Unterbau. Die für die gusseisernen und stählernen Brückenlager so typischen Bündelungen der Lastlinien mit den damit einhergehenden und noch zu diskutierenden Problemen blieben nun aus – ein Vorteil, der zur sukzessiven Ablösung der eisernen Brückenlager und zu ihrem Bedeutungsverlust für den konstruktiven Ingenieurbau führen sollte. (Abb. 25)

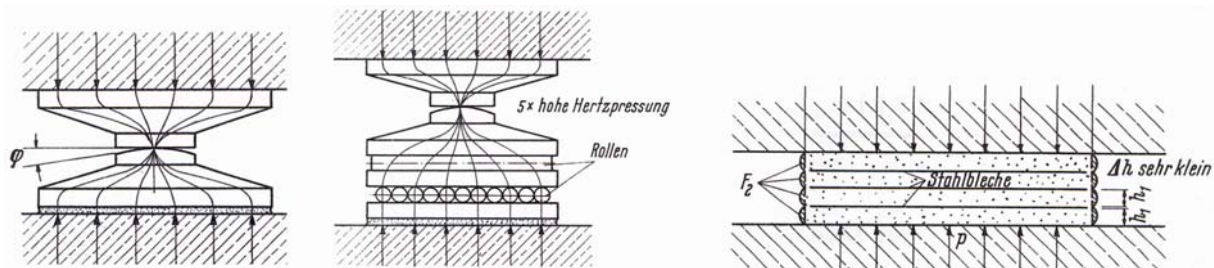


Abb. 25: Lasttransfer im Vergleich; Links/Mitte: Lasteinschnürungen bei eisernen Brückenlagern, Rechts: Flächiger Lasttransfer bei Verformungslagern; [2]

4.3.5 Generationswechsel

Ab Mitte der 1950er-Jahre wurde innerhalb weniger Jahre eine neue Generation von Brückenlagern geschaffen, welche die herkömmlichen stählernen Lager inzwischen nahezu vollständig verdrängt hat. Voraussetzung für den Generationswechsel war die Etablierung neuer Werkstoffe in der Lagertechnik, allen voran die bereits beschriebenen Gummilager.

Erst aber die Einführung des in den Nachkriegsjahren entwickelten Polytetrafluoräthylen – PTFE oder kurz „Teflon“ – komplettierte die neue Lagergeneration. Die hervorragenden Eigenschaften dieses Kunststoffes mit extrem glatter Oberfläche bewirkten eine Renaissance der Gleitlager als bewegliche Lager. Stählerne Gleitlager waren wegen der hohen Reibung inzwischen bedeutungslos geworden. Mit den neuen Teflonlagern waren Reibungsbeiwerte unter 5 % der vertikalen Auflast möglich, damit also im Bereich des Reibungswiderstandes von Rollenlagern. Im Gegensatz zu diesen sank aber bei Teflonlagern die Reibungszahl mit zunehmender Auflast [36/S.45] – eine wunderbare Eigenschaft, mit der sich die neuen Lager ausdrücklich für große Tragwerke empfahlen. Darüber hinaus gewährleistete die Teflonschicht bei geringer Aufbauhöhe eine allseitige Verschieblichkeit, war korrosionsbeständig, standfest unter hohen Pressungen und frei von kritischen Lasteinschnürungen. Um Überbauverdrehungen zu erlauben, musste das Teflon-Gleitteil um ein Kippteil ergänzt werden. So entstanden Topf-, Verformungs- sowie Punktkipp-Gleitlager (Abb. 26).

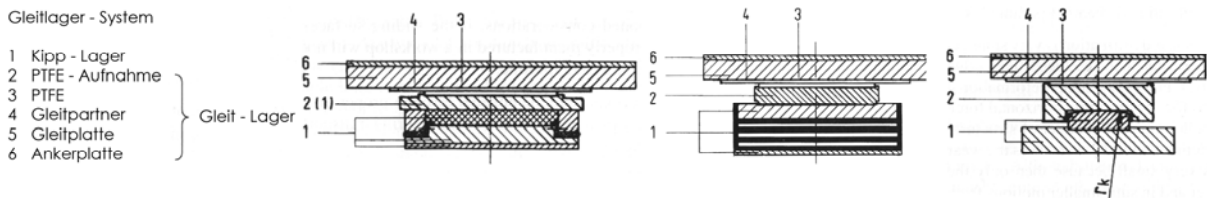


Abb. 26: Links beginnend: Topf-Gleitlager, Verformungs-Gleitlager, Punktkepp-Gleitlager; nach [32]

Erst Teflon ermöglichte auch die Entwicklung des Kalottengleitlagers, bei dem Überbauverdreherungen durch gleitende Verschiebungen in einem Kugelgelenk ermöglicht wurden. Das Prinzip des Kugelgelenks war bereits beim Kugelzapfen-Kipplager verwirklicht worden, allerdings mit hoher Reibung bei vergleichsweise kleiner Kraftübertragungsfläche. Beim Kalottengleitlager hingegen wurden die Radien der zusammenwirkenden Flächen deutlich vergrößert und damit der flächige Lasttransfer optimiert. Das Problem der Reibung war dank Teflon gelöst. Noch heute – fast ein halbes Jahrhundert später – gibt es im Großbrückenbau für diese Lager keine Alternative [36/S.64]. Die so entstandenen Lagertypen repräsentierten im Wesentlichen die neue, noch heute übliche Generation von Brückenlagern (Abb. 27).

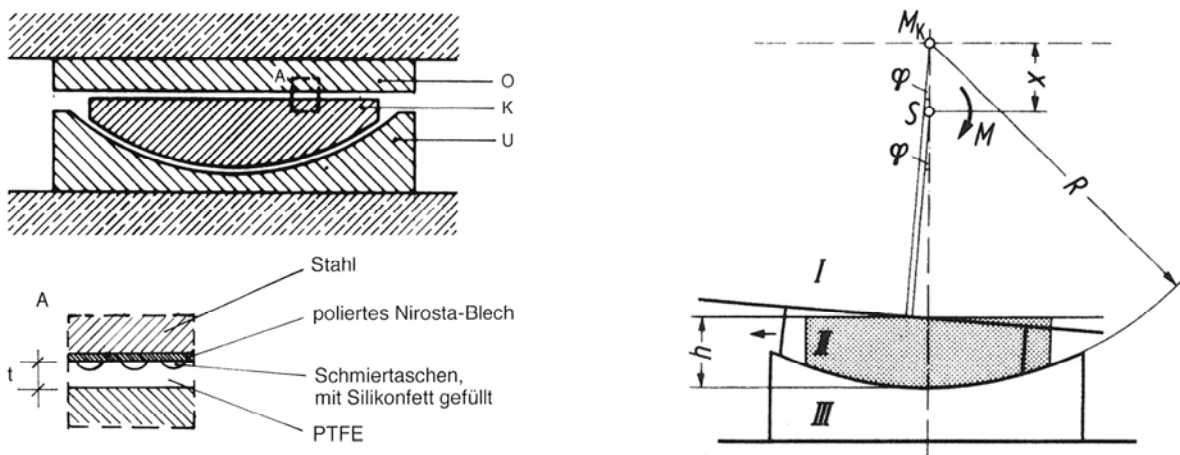


Abb. 27: Kalottengleitlager, Links: Schnitt und Detail mit Angaben zum Material [34], Rechts: Kinematik bei der Verdrehung eines Kalottengleitlagers; die Skizze verdeutlicht die Relativverschiebung in der oberen Gleitebene auf Grund der üblicherweise unterschiedlichen Drehpunkte von Kalotte und Überbau; [29]

4.3.6 Integralbrücken

Die übliche Entkopplung des Brückenüber- und -oberbaus von den angrenzenden Bauwerksteilen durch Brückenlager bzw. Bewegungsfugen erfordert eine regelmäßige Wartung dieser Schnittstellen in den Jahren der Bauwerksnutzung. Um die mit dem Einbau von Brückenlagern und Bewegungsfugen verbundenen Nachteile zu vermeiden, gab es im ausgehenden 20. Jahrhundert verstärkt Überlegungen, durch fugenlose Brückenbauwerke (Integralbrücken) wartungsfreie und gleichzeitig robuste sowie dauerhafte Konstruktionen zu er-

richten. Neben vereinzelt veröffentlichten Fachzeitschriften⁴⁷ widmete sich Heft 496 des DAfStb ausschließlich dem *Entwerfen und Bemessen von Betonbrücken ohne Fugen und Lager*⁴⁸. Die dort gegebenen Empfehlungen für den Entwurf monolithischer Brücken beginnen mit dem grundsätzlichen Ratschlag, bei Brücken geringer oder mittlerer Spannweite gänzlich auf Lager und Fugen zu verzichten [38/S.118].

Damit kündigt sich knapp zwei Jahrhunderte nach dem Erscheinen erster beweglicher Brückenlager erneut ein Paradigmenwechsel an, gehört es doch inzwischen zum Kanon im Ingenieurbau, Brücken mit beweglichen Auflagern auszustatten. Wie selbstverständlich bewegliche Brückenlager aktuell zum Brückenentwurf gehören, verdeutlicht ein Blick in ein einschlägiges Lehrbuch der Tragwerkslehre:

„Die Wärmedehnung der Brücke erfordert, dass der Brückenträger nur an einem Auflager unverschieblich, an dem anderen (bzw., falls er über mehrere Auflager läuft, an allen anderen Auflagern) verschieblich gelagert ist, weil sonst die Wärmedehnung zu hohen Spannungen in den Bauteilen führen könnte“ [528/S.45],

schreiben KRAUS/FÜHRER/NEUKÄTER in *Grundlagen der Tragwerkslehre 1*. Der Einsatz beweglicher Auflager wird nicht mehr hinterfragt, sie sind selbstverständliche Bestandteile einer jeden Brücke geworden. Die spezifischen Bedingungen jedoch, die im „Jahrhundert des Eisens“ zur Etablierung beweglicher Tragwerksteile geführt haben, bleiben ausgeblendet. Seinerzeit forderten die filigranen eisernen Tragwerke insbesondere für weitspannende Überbauten eine Entkopplung dieser vom Unterbau. Bei den vielen Brücken kleiner bis mittlerer Spannweite jedoch, die heute üblicherweise in Stahl- oder Spannbeton ausgeführt werden, gelten andere Vorzeichen. Hier kann eine vergleichsweise große Bauwerksmasse aktiviert werden, die – entsprechend ausgelegt und bewehrt – auch die aus Temperaturschwankungen, Kriechen und Schwinden resultierenden Zwängungen aufzunehmen in der Lage ist. Zwar wird sich dieses Potenzial nur für Brücken kurzer und mittlerer Spannweite nutzen lassen. Interessant bleibt jedoch die Feststellung, dass wirtschaftliche Überlegungen – nämlich die Vermeidung aller mit Brückenlagern verbundenen Kosten – an der Schwelle zum 21. Jahrhundert zu einer Rückbesinnung auf den monolithischen Charakter des Betons führen sowie zu einer Abkehr von gewohnten Denkmustern raten.

⁴⁷ Z.B. in [232], [146].

⁴⁸ Siehe dazu [38].

4.4 Entwicklungen jenseits der Balkenbrücken

Das vorige Kapitel hat die Entwicklung der Brückenlagertechnologie differenziert am Beispiel der Balkenbrücken aufgezeigt. Um den Blickwinkel zu weiten, soll nachfolgend ergänzend für Bogenbrücken und Anwendungen im Hochbau skizziert werden, wie in diesen Bereichen die Auflagerung von Tragwerken konstruktiv gelöst wurde.

4.4.1 Bogenbrücken

Schon die Ausführungen im Abschnitt 4.2.3 zum Umgang mit den aus Temperatureinfluss resultierenden Problemen an frühen – oft noch gusseisernen – Brückenbauten zeigten, wie deren Konstrukteure bereits im frühen 19. Jahrhundert nach Lösungen suchten und mit der Einführung beweglicher Lager – bei Bogenbrücken hat sich der Begriff „Gelenk“ eingebürgert – eine geeignete Methode fanden. Das Gelenk sollte sich schließlich als Methode auch bewähren, es gab allerdings auch alternative Ansätze. So schlug zum Beispiel ROBERT GERWIG⁴⁹ eine „selbstwirkende Keilvorrichtung“ vor, bei der über ein eher filigranes Hebelsystem die Spannweite einer Bogenbrücke abhängig von der Umgebungstemperatur variiert werden sollte. Der Vorschlag wurde 1863 publiziert, und das Prinzip⁵⁰ fand bei der 1862 gebauten Rheinbrücke in Konstanz vermutlich eine erste Anwendung [118]. Inwieweit es jemals seiner Bestimmung entsprechend funktionierte, bleibt fraglich. Als ernst zu nehmende Konkurrenz zur Gelenkbogenbrücke⁵¹ konnte es zumindest nicht heranreifen (Abb. 28).

⁴⁹ ROBERT GERWIG (1820-1885).

⁵⁰ Das Prinzip wird von KÖPKE wie folgt zusammengefasst und gewertet: „Sie [die Brücken; A.d.Verf.] sind verschiebbar, üben im unbelasteten Zustande keinen Schub aus und verlängern oder verkürzen sich, entsprechend dem Wechsel der Temperatur; ein Keil legt sich jedoch stets willig in die zwischen Widerlager und dem letzten Bogen gebildete Fuge, so dass bei Belastung des Ganzen, wenigstens am Ende ein Widerlager vorhanden ist. Der Umstand, dass diese Art Brücken ihre Eigenlast als Balken tragen, benimmt denselben bei großen Spannweiten jeden constructiven Vorzug vor den Balkenbrücken [...]. Eine Ersparung an Material ist durch diese Brücken ebenso wenig zu erzielen. Als Vortheil dagegen lässt sich ihr besseres Aussehen gegenüber den Balkenbrücken anführen und somit ihre Anwendung bei kleineren Spannweiten allerdings rechtfertigen“ [183/S.77f].

⁵¹ Die Gelenkbogenbrücke ist prinzipiell eine Entwicklung der ersten Jahrhunderthälfte, beginnend wahrscheinlich mit der Idee eines Scheitelgelenks für den kühnen Entwurf einer Themsebrücke um 1801, über die Kämpfergelenke der Gebrüder LEATHER (vgl. Abb. 5), die Scheitelgelenke DALLOTS, die theoretische Behandlung des Dreigelenksystems durch KÖPKE, bis hin zu den realisierten Dreigelenk-Bogenträgern HERMANNNS und SCHWEDLERS von 1864 bzw. 1865 (Einen Überblick dazu gibt vor allem [196]). Trotz dieses reibungslos erscheinenden Prozesses hin zum Dreigelenkbogen sollte dieser nicht zum den Bogenbrückenbau beherrschenden statischen System nach der Jahrhundertmitte werden – im Gegenteil. Unter den größeren in Deutschland bis zur Jahrhundertwende gebauten eisernen Bogenbrücken blieb der Dreigelenkbogen als Grundsystem die Ausnahme [204/S.70,72]. Beliebtheit erfreuten sich die Zweigelenkbogenbrücken [6/S.743].

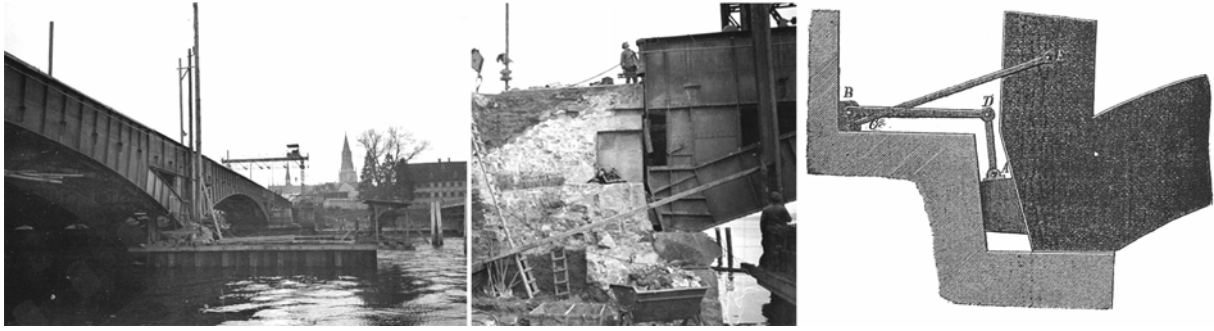


Abb. 28: Rheinbrücke Konstanz; Links/Mitte: Ansicht und Auflagerdetail beim Abriss um 1930 [675], Rechts: Prinzip der Keilvorrichtung [118]

Abweichend von Balkenbrücken stand bei Bogenbrücken nicht die Translation, sondern ausschließlich die Rotationsfähigkeit der den Überbau bildenden Tragwerksteile in deren Auflagerpunkten im Fokus. Die aufwändigen Dilatationsapparate der Balkenbrücken konnten somit entfallen. Vergleichsweise einfach waren die Lösungen – vor allem im eisernen Brückenbau, der das 19. Jahrhundert dominierte. An den Kämpfergelenken lagen die abgerundet gegossenen Enden der Überbauträger in korrespondierenden Lagerschuhen (vgl. dazu Abb. 5 auf S.15). Später – mit der Verwendung von Schmiedeeisen für das Tragwerk – wurden den Trägerenden entsprechend gegossene Passstücke aufgeflanscht. Letztlich sollten auch bei eisernen Bogenbrücken die Konstruktionsmuster angewendet werden, die sich ebenfalls für Balkenbrücken als Standard etablierten – die Berührungs- und die Zapfen-Kipplager mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen. Die Entscheidung für die Art der Auflagerung oblag in der Regel den Brückenbauanstalten. Insgesamt dürfte jedoch aus Sicht des Verfassers das Zapfengelenk – bestehend aus zwei einen Zapfen umschließenden Lagerschalen – zahlreicher verwendet worden sein. Abb. 29 zeigt eine typische Anwendung am Pont Alexandre III in Paris (1896-00) sowie eine eindrucksvolle Ausführung für die Sydney Harbor Bridge (1924-32).



Abb. 29: Zapfen-Kipplager an Bogenbrücken; Links/Mitte: Pont Alexandre III – Ansicht und Lagerdetail [673], Rechts: Lager der Sydney Harbor Bridge (wahrscheinlich vor der Auslieferung) [178]



Abb. 30: Bogen-Zugband-Brücke im Cottbuser Goethepark; Diese kleine Brücke von 1998 bietet im Gegensatz zu vielen ähnlichen Brücken großer Spannweite eine sehr gute Zugänglichkeit zu den Lagern. Links: Ansicht, Mitte: allseitig bewegliches Verformungslager, Rechts: Verformungslager mit Queranschlag; [670]

Nach einer Renaissance massiver Bogenbrücken waren es vor allem wirtschaftliche Gründe und die gestalterischen Möglichkeiten, die im Anschluss an den Zweiten Weltkrieg wieder zu einer vermehrten Anwendung stählerner Bogenbrücken führten. Den topographischen Gegebenheiten in Deutschland entsprechend, sind dabei hauptsächlich Bogenbrücken mit unten liegender Fahrbahn errichtet worden, bei denen die Fahrbahn gleichzeitig als Zugband für den Bogenschub fungieren konnte [147/S.96]. Damit entsprach das äußere statische System des Tragwerks demjenigen von Balkenbrücken, womit die Anwendung der hauptsächlich für Balkenbrücken entwickelten und unter Punkt 4.3.4 besprochenen Lagertechnik, hier vor allem der Verformungslager, sich anbot (Abb. 30).

„Echte“ Bogenbrücken hingegen blieben weitgehend den bergigen Regionen vorbehalten. Hier sollten seit Mitte der 1970er-Jahre verstärkt wieder Holzbrücken eine Alternative zu stählernen bzw. zu massiven Brücken bilden [550/Vorwort], deren Detailausbildung sich an bewährten Mustern des Stahlbrückenbaus orientierte. Gegenüber den Zapfen-Kipplagern der Stahlbrücken sollten sich für hölzerne Brücken jedoch die Bolzen-Kipplager durchsetzen, deren Konstruktionsmuster prinzipiell aus der Frühzeit des Baus eiserner Brückenlager stammt, welche in Deutschland jedoch schon in den 1860er-Jahren durch Linien- bzw. Zapfenkipplager verdrängt worden waren (vgl. Abschnitt 4.3.2) (Abb. 31).

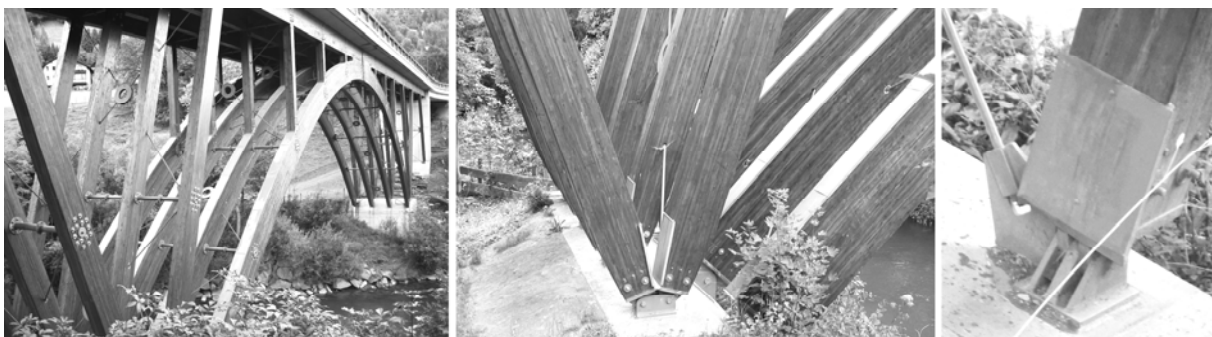


Abb. 31: Europabrücke St. Georgen (1993) über die Mur; Ansicht und Details [672]

Während sich also die Konstruktionsmuster der Lager eiserner Balken- und eiserner/hölzerner Bogenbrücken ähnelten, setzte die im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts „wiedererstandene Vorliebe für massive Brücken“ [190/S.187] bei der Ausbildung von Gelenken neue Impulse⁵². Anlass für die Suche nach neuen konstruktiven Lösungen gaben die permanent auftretenden Risse in den Brückengewölben – mitunter schon bei der Herstellung, regelmäßig beim Ausschalen, oft aber auch erst nach Vollendung des Bauwerks [189/S.41].

Wenngleich einerseits die vom Bau eiserner Brücken bekannten Zapfen-Kipplager übernommen wurden, wie z.B. 1895 bei der Stampfbeton-Donaubrücke bei Inzigkofen (Abb. 32), so gab es andererseits ganz eigene Entwicklungen, die typisch für die Auflagerausbildung massiver Bogenbrücken werden sollten und die mit den im Stahlbrückenbau bekannten Konstruktionsmustern nichts mehr gemein hatten.

Die ersten Vorschläge, die Lage der Stützlinie durch geeignete Maßnahmen zu beeinflussen, kamen wohl um 1870 [254/S. 64] von DUPUIS⁵³. Die von ihm unter anderem vorgeschlagenen „[...] bleibenden Metalleinlagen von einer Drehbewegung zulassenden Form“ [189/S.42] wurden in Deutschland von LEIBBRAND⁵⁴ aufgegriffen, der ab 1885 vornehmlich in Baden-Württemberg eine Anzahl von Stein- bzw. Betonbrücken mit Bleigelenken – allerdings nur temporär für den Bauzustand [547/S.222] – ausstattete.

⁵² LANDSBERG um 1900 zu den Hintergründen der Renaissance massiver Bogenbrücken in [189/ Vorwort]: „Eine Zeit lang schien es, als sollten die gewölbten Brücken durch die Eisenbrückenbauten ganz in den Hintergrund gedrängt werden; aber zur rechten Zeit erkannte man wieder die großen Vorzüge der massiven Brücken sowohl hinsichtlich der ästhetischen Ausbildung, wie der Dauerhaftigkeit und leichten Unterhaltung. So sind denn in den letzten zwanzig Jahren auf diesem Gebiete, welches der Ingenieurkunst schon seit Jahrtausenden angehört, außerordentliche Fortschritte gemacht, welche denjenigen im Eisenbrückenbau getrost an die Seite gestellt werden können. Hauptsächlich wurden dieselben dadurch erreicht, dass ausgezeichnete Ingenieure es verstanden haben, bei den neueren Bauten die Voraussetzungen der Berechnung nahezu vollständig zu erfüllen; ferner durch Vervollkommnung der Vorrichtungen zur Prüfung der zu verwendenden Baustoffe und durch Vornahme von Versuchen in großem Maßstabe, endlich durch Verbesserung des Mörtelmaterials, insbesondere der Cemente. Es ergaben sich hierdurch feste Grundlagen für die Berechnung, und während früher die unbefriedigende Gewölbetheorie und die mangelhafte Kenntnis des Verhaltens der Baustoffe zu sehr großen Gewölbestärken und damit zu sehr schweren Brücken geführt hatte, konnte man nunmehr mit geringen Gewölbestärken verhältnismäßig leicht konstruieren und zu immer kühneren Bauten übergehen. An der Spitze dieser Bewegung schreitet Baden-Württemberg, welches Land eine größere Zahl solcher, nach den neuesten Grundsätzen konstruierter, wohlgelegener und kühner Bauwerke aus neuester Zeit zu verzeichnen hat [...]“.

⁵³ Einen entsprechenden Hinweis gibt (leider ohne Quellenangabe) LEIBBRAND⁵⁴ in [189/S.42]: „Schon seit langer Zeit wurden [...] von DUPUIS [...] Vorschläge gemacht, welche bewirken sollten, dass die Resultante der inneren Kräfte in den Bruchfugen sich möglichst wenig von der Mitte derselben entferne; die Abschrägung dieser Fugen, die geradlinige oder bogenförmige Erweiterung derselben nach außen ohne und mit gleichzeitiger Anbringung von Metallrollen zur Verhütung der Verschiebung der Gelenksteine, die Verstärkung dieser Fugen durch bleibende Metalleinlagen von einer Drehbewegung zulassenden Form, die Einlegung bleibender cylindrischer Eisengelenke, das Einfügen provisorischer Eisengelenke, welche nach dem Ausschalen des Gewölbes wieder beseitigt werden sollten, wurden als Mittel zur Verhütung von Rissen und zur Festlegung der Druckkurven bezeichnet [...]“.

⁵⁴ KARL VON LEIBBRAND (1839-1898).

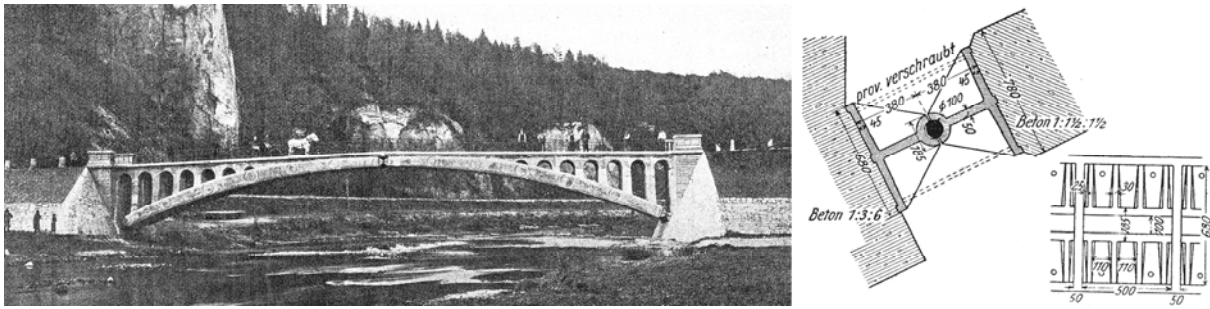


Abb. 32: Gelenkausbildung bei der Donaubrücke Inzigkofen [191]

Bei mittig eingelegten Bleistreifen für dauernd wirkende Bleigelenke stellten sich die für eine Gelenkwirkung erforderlichen Wälzflächen von selbst ein, indem die Randbereiche der Streifen durch Überschreiten der Fließgrenze infolge von Gewölbebewegungen leicht abgewälzt wurden⁵⁵. Prominente und gleichzeitig frühe Vertreter von Brücken mit dauernd wirkenden Bleigelenken baute der Schweizer ROBERT MAILLART⁵⁶. Sein Erstlingswerk, die Stauffacherbrücke in Zürich (1899), hatte sich bezüglich der Tragwirkung noch an traditionellen gewölbten Bogenbrücken orientiert. Hier nutzte MAILLART eiserne Gelenke [116/S.82,83]. Kurz darauf schuf er mit der einfeldrigen Inn-Brücke in Zuoz (1901) und der zweifeldrigen Thurbrücke bei Billwil-Oberbüren (1903) eine ganz neue Art von Bogenbrücke, indem er Bogen, Seitenwände und Fahrbahnplatte zu einem konstruktiven Ganzen vereinigte. Der kastenförmige Querschnitt hatte nach MAILLART auch Vorteile bezüglich der Gelenkausbildung:

„Eine Abweichung der Drucklinie von der rechnermäßigen Lage hat eine relativ geringe Änderung der Kantenpressung zur Folge, so dass [...] mathematisch exakt wirkende Gelenke, die ihrer Subtilität wegen einen schwachen Punkt bilden, nicht mehr nötig sind, sondern einfachere und robustere Anordnungen gewählt werden können“ [283/S.272].

Für die Bögen der Zouz- und Thurbrücke griff MAILLART die Idee der Bleigelenke auf⁵⁷, die er fortan bei den meisten seiner Brücken anwenden sollte. Die Zerstörung seiner Rheinbrücke bei Tavanasa im September 1927 bot die seltene Gelegenheit, unter anderem den Zustand der Bleigelenke zu untersuchen, die sich nach 22 Betriebsjahren in einem guten Zustand präsentierten⁵⁸.

⁵⁵ Zur Wirkungsweise von Bleigelenken siehe [89].

⁵⁶ ROBERT MAILLART (1872-1940).

⁵⁷ Siehe dazu in [144/S.33], [127/S.157].

⁵⁸ Siehe dazu in [547/223], [234/S.235]. Leider zeigten diese Quellen keine Aufnahme des Lagers.

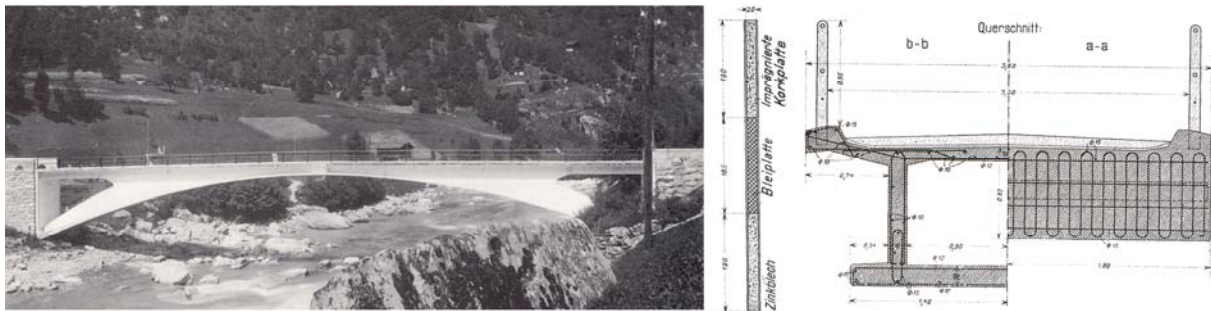


Abb. 33: Tavanasa-Brücke; Links: Ansicht [494], Rechts: Scheitelgelenkdetail [250]

Erst bei der Salginatobelbrücke (1930) sollte MAILLART die für seine Brücken üblichen Bleigelenke aufgeben (Abb. 34). Hier war es aber der Prüfenieur, der die hohe Anzahl von Bewehrungseisen einforderte, die seiner Meinung nach ohne Mithilfe des Betons sämtliche einwirkenden Kräfte aufnehmen sollten. MAILLART hingegen vertrat die Meinung, der Fugenbeton allein könne die Pressung mit Sicherheit ableiten, und die Aufnahme aller Druckkräfte durch die Eisen sei kein Erfordernis⁵⁹. Letztlich entschieden wahrscheinlich die bescheidenen Mehrkosten für die vom Prüfenieur empfohlene stark bewehrte Lösung. Das Prinzip dieser Lager war in Frankreich jedoch nicht neu. Ein frühes Beispiel dieser dort als „semi-articulations“ bekannt gewordenen Ausführungsart zeigt Abb. 35.

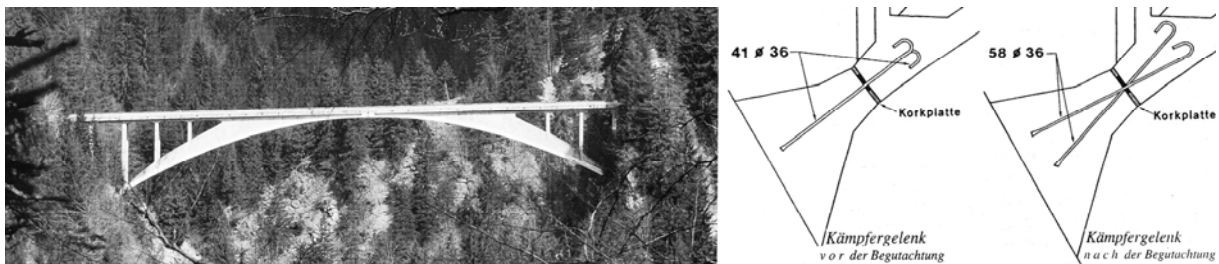


Abb. 34: Salginatobelbrücke; Links: Ansicht [494], Rechts: Kämpfergelenkbewehrung [177]

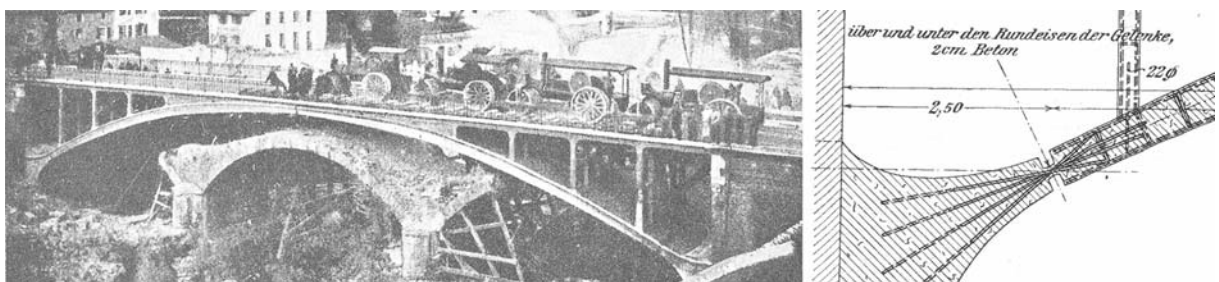


Abb. 35: Brücke bei Amélie-les-Bains, um 1910; Links: Ansicht, Rechts: Kämpfergelenkbewehrung [510]

⁵⁹ Zum Schriftwechsel zwischen MAILLART und dem Prüfenieur (MIRKO ROŠ) siehe [177/S.84f].

Die materialtechnischen Hintergründe für MAILLARTs Argumentation waren von FREYSSINET bereits um 1925 formuliert worden:

„Da die Festigkeit des Betons bei mehrachsiger Druckspannung wesentlich größer als bei einachsiger Beanspruchung ist, kann der Beton in einem aus der Einschnürung einer Stütze bestehenden „Gelenk“ wesentlich höher als mit der „zulässigen Spannung“ beansprucht werden.

Unter diesen Umständen weicht die Arbeitslinie des Betons erheblich von derjenigen bei einachsiger Beanspruchung ab; ferner vermag sich der Beton plastisch zu verformen. Aus diesen Gründen sind die „Gelenke“ zu gewissen Verdrehungen befähigt, ohne Schaden zu erleiden.

Eingelegte starke Bewehrungsstäbe zeigen bei Beanspruchungen nahe der Fließgrenze so starke Stauchungen, dass sie sich vom Beton loslösen und die Neigung haben (besonders bei schräger Führung) auszuknicken und den Beton vorzeitig zu zerstören. Sie vermindern daher zumeist die Bruchlast.“ [22/Vorwort]

FREYSSINET empfahl wegen dieser von ihm formulierten Gründe „[...] reine, nur sehr schwach bewehrte Betonlager, die sich in Frankreich auch gut bewährten“ [22/Vorwort]. Diese fanden unter anderem an seiner Rahmenbrückenserie von Esbly Anwendung, bei der Ende der 1940er-Jahre fünf praktisch baugleiche Brücken mit 74 m Spannweite entstanden (Abb. 36).

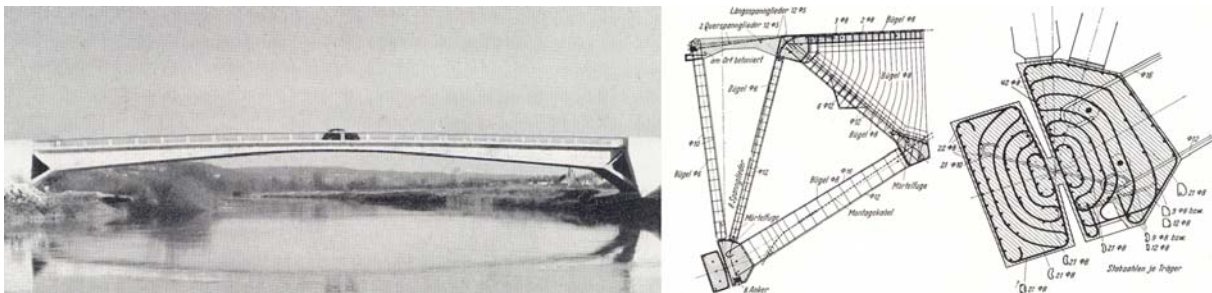


Abb. 36: Marnebrücken „Serie von Esbly“ 1946-50; Links: Ansicht, Rechts: Kämpferdetail [213]

Für diese in Frankreich als „Freyssinet – Gelenk“ bekannten unbewehrten oder schwach bewehrten Lager bürgerte sich in Deutschland der Begriff „Betongelenk“ ein. Für die an der Salginatobelbrücke verwirklichten stark bewehrten Lager hingegen, bei denen die Normalkräfte allein oder fast vollständig von der eingelegten Bewehrung aufgenommen werden können, wurde die Bezeichnung „Federgelenk“ üblich [22/Vorwort]. Beton- und Federgelenke hatten es aber mangels systematischer Untersuchungen über deren Verhalten schwer, sich in Deutschland durchzusetzen. Aus diesem Grund widmete der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton den Federgelenken 1957 [52] und den Betongelenken 1962 [22] jeweils ein eigenes Heft, um die Grundlagen für eine breite Anwendung auch in Deutschland zu schaffen. Feder- oder Betongelenke werden noch heute eingebaut, wenn statisch-konstruktive oder ästhetische Überlegungen zum Bau einer massiven Gelenkbogenbrücke führen (Abb. 37).



Abb. 37: Elbbrücke Mühlberg (2006/08); Links: Ansicht, Mitte/Rechts: Kämpfer im Bauzustand [674] bzw. Konstruktionszeichnung [262]

Bis sich diese Gelenke jedoch in Deutschland durchsetzen konnten, waren neben den preiswerten Bleieinlagen⁶⁰ vor allem Wälzelenke unterschiedlicher Ausbildung zur Anwendung gekommen. Eine erste Bauart verkörperten hier die steinernen Gelenke, wie sie wahrscheinlich erstmals im Jahr 1880 von KÖPKE [41/S.10] bei einer Sandstein-Bogenbrücke bei Langenhennersdorf verwendet wurden [130/S.76]. Die Berührungsflächen waren einerseits konkav, andererseits konvex mit leicht abweichendem Radius gearbeitet (Abb. 38). Der Status einer Gelenkbogenbrücke war jedoch noch temporär, ließ KÖPKE doch nach dem Ausrüsten der Gewölbe die Gelenkfugen mit Zementmörtel ausdrücken, so dass die Bögen unter Verkehrslast als gelenklose Bögen fungierten [59/S.376]. Das KÖPKE'sche Gelenkprinzip fand später für Betonbögen weite Anwendung⁶¹ – entweder aus Beton gegossen oder aus Granit, um besonders hohen Beanspruchungen standhalten zu können⁶² [190].



Abb. 38: Gottleuba-Brücke Langenhennersdorf; Links: Ansicht, Mitte: Auflager [687], Rechts: Prinzipskizze [510]

⁶⁰ Vor allem aus Kostengründen griff man in der Zwischenkriegszeit wieder verstärkt auf die einfachen und billigen Bleigelenke zurück [89/S.29]. Auch nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Bleigelenke (offenbar aus den gleichen Gründen) wieder thematisiert, wie Publikationen von 1952 [101] und 1961 [64] zeigen.

⁶¹ Über frühe Anwendungen und Versuche berichtet [12].

⁶² Die Möglichkeit und Wirksamkeit des Einsatzes von Granit, aber auch von Sandstein und Bleieinlagen, wurden auch experimentell untersucht und die Ergebnisse alsbald in der Fachliteratur publiziert und diskutiert – siehe z.B. in [4], [5], [190], [510/S.75f].

Steinerne Gelenke blieben jedoch weitgehend den Bogenbrücken aus Stein vorbehalten, wo aus ästhetischen und baulichen Gründen nur ein Baustoff verwendet werden sollte [57/S.105]. Außerdem führten bei steinernen Gelenken, aber auch bei solchen aus Beton, schon geringe Baugrundbewegungen wegen der großen Radien der Kontaktflächen zu deutlichen Verschiebungen des Drehpunkts. EMIL MÖRSCH⁶³, der bei den beiden 70 m spannenden Bögen der Isarbrücke bei München großen Wert auf eine möglichst exakte Fixierung der Stützlinie legen musste, setzte an dieser das Prinzip der Wälzgelenke in Stahlguss um, womit sich der mögliche Abwälzweg deutlich eingrenzen ließ⁶⁴ [211/S.265] (Abb. 39).

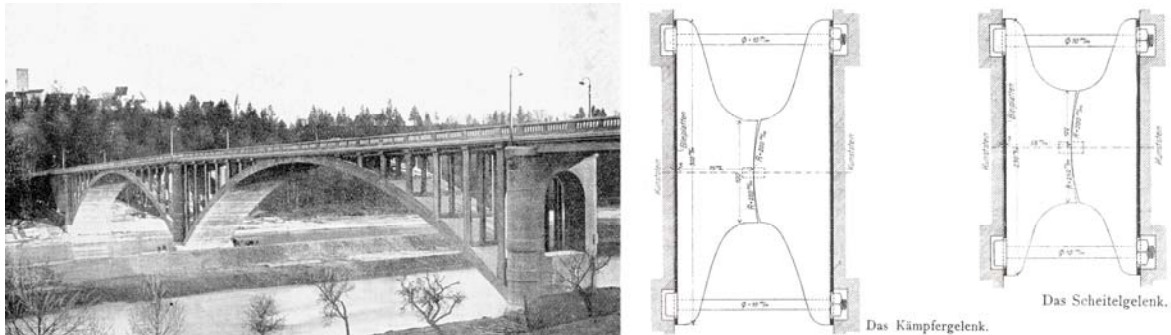


Abb. 39: Isarbrücke bei München; Links: Ansicht [545], Rechts: Gelenkkörper [211]

MÖRSCHS stählerne Gelenke entsprachen ihrer Wirkungsweise nach dem Prinzip der Linienkipplager, wie sie im Abschnitt 4.3.2 vorgestellt wurden. Trotz der Vorteile dieser Linienkipplager konnten sich die schon um 1890 in Inzigkofen (Abb. 32, S.37) verwendeten Zapfenkipplager noch weit bis ins 20. Jahrhundert hinein als Alternative für massive Gelenkbogenbrücken behaupten. Ihr Nachteil – insbesondere die bei weit und flach gespannten Brücken einhergehende hohe Zapfenreibung – wurde durch eine Bevorteilung in den Bestimmungen der DIN 1075 ausgeglichen, die für Zapfengelenke eine 1,5fach höhere Belastung als für Linien-Kipplager zuließ [138/S.21f]. Dieser fachlich schwer zu begründende Umstand und der daraus resultierende Austausch zwischen Tragwerksplaner (DISCHINGER) und Prüfingenieur (GEHLER) bei der Planung der Moselbrücke in Koblenz (1932-34, Abb. 40) führten zu einer – nach heutigem Sprachgebrauch – „Zulassung im Einzelfall“ von Linienkipplagern an diesem Bauwerk sowie im Nachgang zu einer Anpassung der Regelwerke [138/S.21f].

⁶³ EMIL MÖRSCH (1872-1950).

⁶⁴ Nach MÖRSCH ist der Abwälzweg des für die zulässige Pressung von 6500 kg/cm² bemessenen Stahlgelenks 52 mal kleiner als beim Wälzgelenk aus bestem Beton [547/S.247]. Zu den unter Umständen beträchtlichen Wälzwegen von Gelenken aus Stein oder Beton siehe in [89/S.30], [153/S.56], [89/S.30].

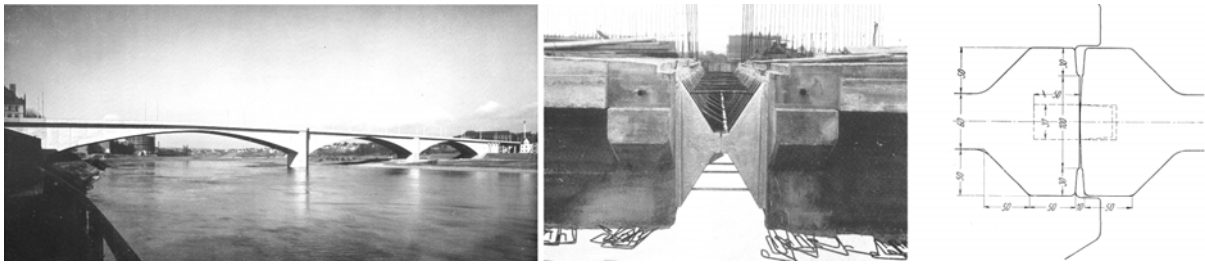


Abb. 40: Moselbrücke (1934 als Adolf-Hitler-Brücke eröffnet) in Koblenz; Links: Ansicht, Mitte/Rechts: Scheitelgelenke in Ansicht und Detail; [138]

Die Dollen in der Kontaktlinie der Wölbflächen, welche z.B. die Lager der Isarbrücke (Abb. 39) als auch die der Moselbrücke (Abb. 40) aufwiesen, sollten neben einer zusätzlichen Zentrierung der Lagerhälften vor allem ein gegenseitiges Abgleiten der Lagerhälften verhindern. Seit dem Absturz des Gewölbes der Maximiliansbrücke in München im Sommer 1904 wollte man sich bezüglich der Übertragung der Querkräfte nicht mehr allein auf die Reibung zwischen den Gelenkhälften verlassen⁶⁵ (Abb. 41).

Neben spezifischen Vor- und Nachteilen hatten die genannten Wälzlager – aus welchem Material auch immer – gemeinsame Nachteile. Zum einen waren sie vergleichsweise teuer in der Anschaffung, zum anderen war die passgenaue Herstellung bzw. Montage auf dem Lehrgerüst aufwändig und schwierig. Entsprechende Vorteile boten hier die in den frühen 1930er-Jahren auf den Markt drängenden gepanzerten Betonwälzgelenke. Die unter dem Namen ihres Erfinders als „Burkhardt-Gelenke“ in den Brückenbau eingegangenen Wälzgelenke erlangten weite Verbreitung und wurden über Jahrzehnte eingesetzt [36/S.30]⁶⁶.



Abb. 41: Maximiliansbrücke München; Links Ansicht [686], Mitte/Rechts: Abgerutschtes Lager – Ansicht [136] und Skizze [547]

⁶⁵ Siehe dazu in [136], [547/S.252].

⁶⁶ Patentierte 1927 und 1950 – siehe K9- 13 und K9 - 25.

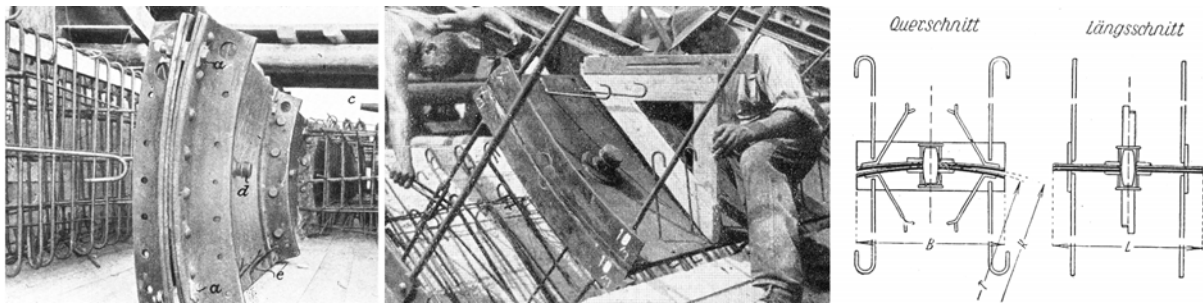


Abb. 42: Gepanzerte Wälzgelenke „Burkhardt-Gelenke“; Links/Mitte: Einbau [547], Rechts: Prinzipskizzen [664]

Bei aktuellen Projekten wird jedoch versucht, auf den gelenklosen und statisch unbestimmten Bogen als Tragwerk zurückzugreifen. Die Gründe dafür sind prinzipiell die gleichen, wie sie BAY, DEININGER UND LEONHARDT bereits 1958 formulierten:

„Mit fortschreitender Entwicklung der Theorie der gelenklosen Gewölbe, der elastizitätstheoretischen Erkenntnisse, der Theorie der statisch unbestimmt gelagerten Bogenträger, vor allen Dingen aber im Zuge einer fortschreitenden Erkenntnis über das Kriechen und Schwinden, nicht zuletzt aber durch die Erfahrungen, die bei der dauernden Unterhaltung von Brückengelenken und der in der Fahrbahn notwendigen Fugen gemacht wurden, zeigte sich dann das Bestreben, wenn irgend möglich, Gelenke zu vermeiden oder sie nur als provisorisch wirkende Baugelenke vorzusehen“ [213/S.320].

Vermutlich bildeten diese Gründe auch schon für MÖRSCH den Hintergrund für den Entwurf der gelenklosen Gmündertobelbrücke, die „[...] für die Entwicklung des gesamten Stahlbetonbrückenbaus zu Beginn dieses [des 20.; A.d.Verf.] Jahrhunderts maßgebend und richtungsweisend [...]“ [213] werden sollte. Hatte sich MÖRSCH insbesondere wegen der unklaren Baugrundverhältnisse bei der Isarbrücke bei München (eröffnet 1904, Abb. 39) noch für zwei Dreigelenkbögen entschieden [211], so konzipierte er den Bogen der nur wenig später errichteten Gmündertobelbrücke (eröffnet 1908, Abb. 43) als eingespanntes Gewölbe [212]. Mit diesem Schritt hin bzw. wieder zurück zur gelenklosen – integralen – Brücke wies MÖRSCH schon vor 100 Jahren den Weg in eine dem monolithischen Charakter des Betons entsprechende fugenlose Konstruktionsweise – ein Weg, wie er bei Balkenbrücken erst seit dem ausgehenden 20. Jahrhundert gesucht wird.

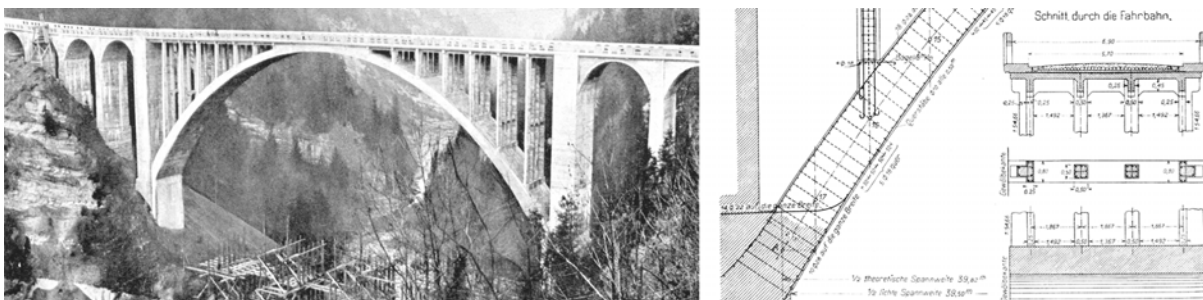


Abb. 43: Gmündertobelbrücke; Links: Ansicht [212], Rechts: Kämpferdetail [546]

4.4.2 Entwicklungen im Hochbau

Gewöhnlich wird die Pionierarbeit bei der Entwicklung der Lagertechnik dem Brückenbau zugeschrieben. Nachfolgende Betrachtungen werden aber zeigen, dass Innovationen oft auch im Bereich des Hochbaus stattfanden. Die Gründe dafür liegen nah. Die Planung erster eiserner Brücken ging einher mit einer Diskussion über die Anwendbarkeit des Eisens für größere Dachkonstruktionen – vorerst, um leichte und vermeintlich feuerfeste Konstruktionen zu ermöglichen – später, um Spannweiten zu erreichen, die mit herkömmlichen hölzernen Bindern nicht mehr wirtschaftlich zu errichten waren oder schlichtweg unmöglich schienen. Die Parallelen zum Brückenbau bezüglich des Erkenntnisgewinns sind dabei auffallend, verwundern aber kaum, da in die Planung innovativer Hochbau- und Brückenkonstruktionen oft dieselben Personen eingebunden waren.

Um 1800 waren auch im Hochbau die aus Temperaturveränderung resultierenden Bewegungen eiserner Tragwerke erkannt. Für die Wiedererbauung der 1802 abgebrannten hölzernen Kuppel der Halle-au-blé in Paris zum Beispiel wurde zwar ein Neubau aus Eisen in Betracht gezogen, von RONDELET⁶⁷ – der 1803 in einem Gutachten mögliche Varianten für den Wiederaufbau diskutierte – aber unter anderem auf Grund der zu erwartenden Temperaturbewegungen nicht favorisiert⁶⁸. RONDELETs Empfehlung einer massiven Kuppel [269/S.90] wurde später jedoch zugunsten einer eisernen Kuppel wieder verworfen, die schließlich um 1810 errichtet wurde [487/S.295].

Trotz des prinzipiell vorhandenen Bewusstseins über Temperaturbewegungen lassen – wie schon im Fall der ersten eisernen Brücken – auch die frühen eisernen Dachkonstruktionen Vorkehrungen für die Aufnahme bzw. den Ausgleich von Temperaturbewegungen noch vermissen. Wir finden solche weder bei der schmiedeeisernen Kuppel über den Ostturm des Mainzer Doms (1828) noch bei der Gießereihalle der Sayner Hütte (1830), letztere mit einer gänzlich aus Eisen bestehenden inneren Tragstruktur. Andererseits gibt die Sayner Hütte ein frühes Beispiel, wie mit Elementen des Maschinenbaus in Form von Kugellagern bereits auf die Einführung eiserner Tragstrukturen in den Hochbau reagiert und schließlich der traditionelle hölzerne Lastdrehkran der Eisengießereien abgelöst wurde (Abb. 44).

⁶⁷ JEAN-BAPTISTE RONDELET (1743-1829).

⁶⁸ „[...] Holz und Eisen, welches durch seine Elasticität bey Wärme und Kälte, bey Trockenheit und Nässe, sich ausdehnt und auch wieder zusammenzieht, erfordert eine außerordentliche Vorsicht, um die aus der immer abwechselnden Bewegung entspringenden nachteiligen Wirkungen zu verhindern“ [269/S.79].

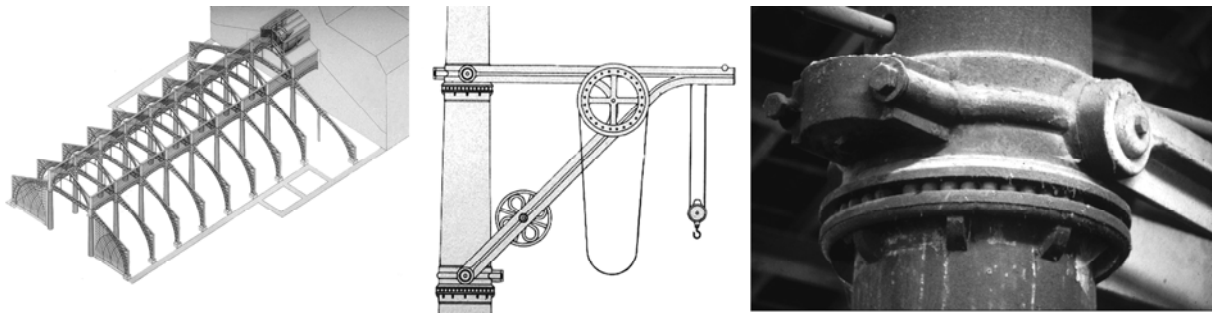


Abb. 44: Gießereihalle der Sayner Hütte; Links: Innere Tragstruktur, Mitte/Rechts: Prinzip/Detail des Lastdrehkrans mit Kugellagern [556]

Auch im internationalen Kontext fanden sich für die ersten Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts keine beweglichen Lager im Hochbau. Solche gab es weder an dem dann schließlich wieder aufgebauten Dach der Halle-au-blé in Paris [487/S.296] noch am neuen gusseisernen Dachstuhl der Kathedrale in Chartres (1837) [487/S.299], weder an den ab 1838 errichteten schmiedeeisernen Dachbindern der Neuen Eremitage in St. Petersburg [670] noch am imposanten Dach des städtischen Theaters („Teatro Goldoni“) in Livorno (bis 1845)⁶⁹, um nur einige wenige prominente Bauten aufzuführen. Selbst für das weitläufige Tragwerk des Kristallpalastes in London (1850-51) waren planmäßig keine Dehnungsfugen vorgesehen [265/S.48]⁷⁰. Und im Falle zwischen gelegter hölzerner Auflager waren diese konstruktiv bedingt und noch nicht zum Ausgleich etwaiger Temperaturbewegungen gedacht. Bei Bedarf vermittelten auch im Hochbau gusseiserne Schuhe zwischen Dachtragwerk und aufgehendem Mauerwerk (Abb. 45).

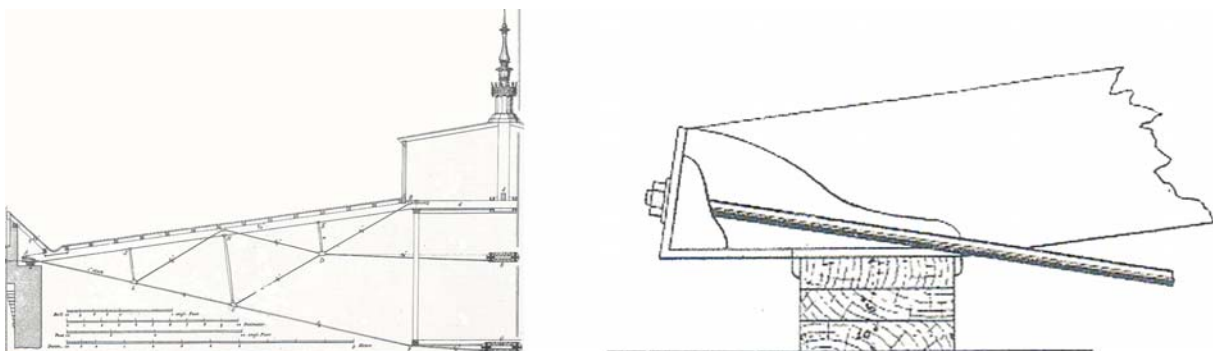


Abb. 45: Gasometer in Berlin, 1845 [541]; Links: Prinzip der Überdeckung, Rechts: Detail des Auflagers; [132]

⁶⁹ Nach [659]; siehe dazu auch in [235].

⁷⁰ Das Fehlen von Ausdehnungsfugen verursachte diverse Probleme am Tragwerk. Glücklicherweise war das „Längsschiff“ ungefähr mittig durch eine Querhalle getrennt, welche die Funktion einer großen Dehnungsfuge übernahm [555/S.235].



Abb. 46: Vorschlag VOITS für einen gusseisernen Binder [263]

Vertrauten die einen sicherlich der Robustheit ihres Bauwerks in der Hoffnung, dass es nicht zu schädlichen Einflüssen komme, so unterschätzten andere schlichtweg die Kraft, mit der sich ein ausdehnendes Tragwerk Raum verschaffen kann. So thematisierte 1823 der Königliche Kreisbauinspektor VOIT den Temperatureinfluss bei gusseisernen Dachstühlen: „Die Ausdehnung des Metalls durch die Sonnenhitze ist unendlich viel kleiner als das Schwinden des Holzes durch den nämlichen Hi[t]zgrad. – Von dieser Seite ist daher nichts zu befürchten“ [263/S.262]. So weist auch sein als Ersatz für den abgebrannten Dachstuhl des königlichen Hof- und Nationaltheaters in München vorgeschlagener gusseiserner Binder noch keine Vorkehrung auf, um Verschiebungen an den Auflagern zu ermöglichen (Abb. 46).

Erst um 1840 kam buchstäblich „Bewegung“ in die Konstruktion eiserner Dachstühle. 1839 entwarf JOHN NIERNSEE⁷¹ einen gusseisernen Dachstuhl mit 32 Fuß (knapp 10 m) Spannweite für die Baltimore- und Ohio-Eisenbahn, dessen Hauptmerkmal die scharnierartigen Verbindungen aller eisernen Teile des Binders waren, „[...] um welche sich dieselben im Falle der Ausdehnung oder Verkürzung des Eisens [...] ungehindert bewegen können [...]“ (Abb. 47). Die Art und Weise der Verbindung ermöglichte hierbei, dass „[...] die neutrale Axe sich immer in der Mitte befindet“ [219/S.346] – ein für diese Zeit bemerkenswerter Ansatz. Die Befestigung der Binder erfolgte in Langlöchern, um „[...] hinlänglichen Spielraum [...] für die Ausdehnung und Verkürzung [...] des ganzen Gespärres zu haben, ohne einen schädlichen Schub auf die Hauptmauern auszuüben“ [219/S.347]. Um 1841 entwarf NIERNSEE eine eiserne Kuppel mit 16,5 m (55 Fuß) Durchmesser, deren Binder auf kleinen Kugeln oder Rollen lagern sollten [219/S.347 Fußnote]. Er hinterließ hierfür leider keine erklärende Skizze; bei den angedachten Kugel- oder Rollenlagern wird es sich mit großer Sicherheit aber um Flächenlager gehandelt haben, wie sie BORSIG⁷² einige Jahre später in Deutschland für die Lagerung der Kuppel der Potsdamer Nikolaikirche verwendete (Abb. 48).

⁷¹ JOHN RUDOLPH NIERNSEE, in Wien geboren als JOHANN RUDOLPH NIERNSEE (1814–1885).

⁷² JOHANN CARL FRIEDRICH AUGUST BORSIG (1804-1854).

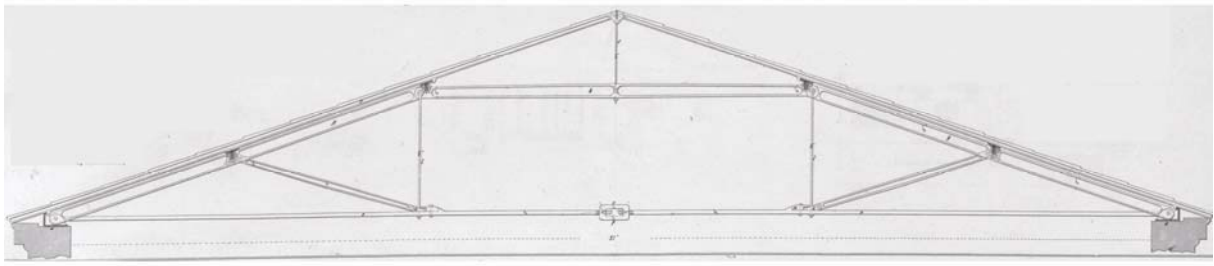


Abb. 47: NIERNSEE's gusseiserner Dachbinder, 1839 entworfen und 1840 ausgeführt [219]

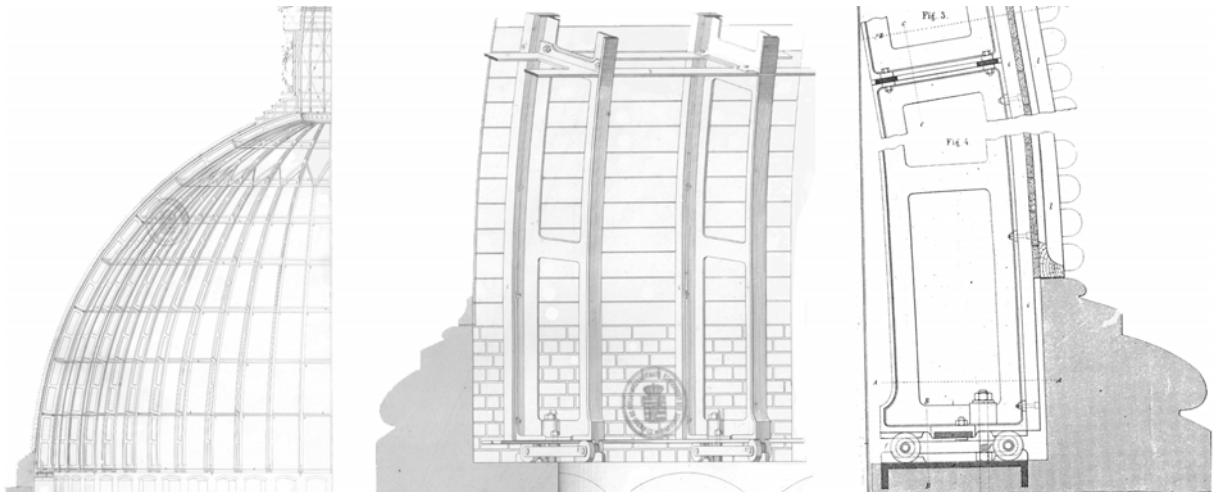


Abb. 48: Kuppel der Nikolaikirche in Potsdam, 1847; Links: Schnitt, Mitte: Auflagerbereich; [279], Rechts: Auflagerdetail [132]

Nach der Jahrhundertmitte wurde die Entwicklung der Lager im Hochbau hauptsächlich durch den Bau großer Bahnhofshallen befördert. Die Art und Weise der Trägerauflagerung variierte dabei in Abhängigkeit vom statischen System des Hallentragwerks. Für die zunächst verwendeten Sichelbinder bzw. die unterspannten Bögen eigneten sich die Flächen- und Kipplager, wie man sie prinzipiell auch an Balkenbrücken einsetzte (Abb. 49).

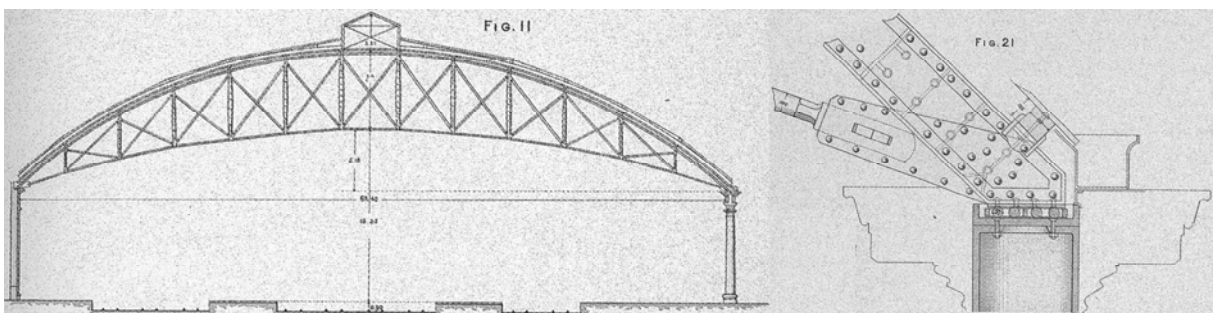


Abb. 49: Sichelbinder der Birmingham Station, um 1850 [559]; auffallend ist die Ähnlichkeit mit dem Vorschlag VOITS von 1823 – siehe Abb. 46



Abb. 50: Waterloo International Station; Links: Ansicht, Rechts: Auflagerdetail [670]

Zur beherrschenden Trägerform entwickelte sich jedoch der Dreigelenkbogen, der im Bahnhofsbau vermutlich erstmals 1866/67 für die Halle des neuen Berliner Ostbahnhofs von SCHWEDLER angewandt wurde⁷³. Damit wurde das Dreigelenksystem praktisch zeitgleich im Hoch- und Brückenbau eingeführt, denn nur kurze Zeit vorher – 1864 – baute HERMANN eine erste Dreigelenkbogenbrücke über die Wien [204/S.24]. Komplizierte Dilatationsvorrichtungen mit Wälzkörpern waren für Dreigelenkbögen nicht mehr erforderlich, und die bereits im Punkt 4.4.1 beschriebenen Zapfengelenke entwickelten sich zum vorherrschenden Lagerdetail. Ihr Konstruktionsmuster ist noch heute Vorbild für Gelenkausbildungen im Hochbau, wie es beispielhaft an der 1993 eröffneten Waterloo International Station in London inszeniert wurde (Abb. 50).

Führte diese erste – am Beispiel der Bahnhofshallen skizzierte – Entwicklungslinie der Lagertechnik im Hochbau von den Flächenlagern mehr oder weniger direkt zu den Zapfen der Dreigelenk Konstruktionen, so formte sich gleichzeitig eine Tradition aus den bereits für Balkenbrücken im Abschnitt 4.3 vorgestellten Konstruktionsmustern. Insbesondere für Kuppelbauten, die sich auf Grund des räumlichen Tragverhaltens aus statisch-konstruktiver Sicht auf ein flächiges Dreigelenksystem nicht ohne weiteres herunter brechen ließen, bedienten sich die Ingenieure der Vielfalt der Lagertechnik. Exemplarisch sei dies an zwei Kuppelbauten erläutert, die vor bzw. nach der Wende zum 20. Jahrhundert errichtet wurden und in Bezug auf die Lagerung eine ganz wesentliche gemeinsame Bedingung zu erfüllen hatten – aus der Kuppel sollten ausschließlich senkrechte Auflagerkräfte abgetragen werden.

⁷³ Siehe dazu in [196], [518].

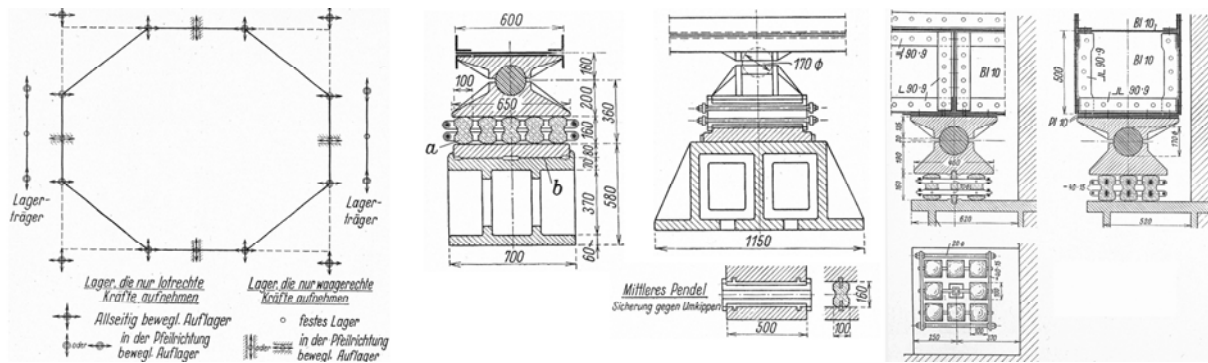


Abb. 51: Reichstagskuppel Berlin; Links: Anordnung der Lager, Mitte: Vierseitig bewegliche Auflager – eine Richtung per Stelzen, orthogonal dazu per Gleitebene, Rechts: Allseitig bewegliche Lager der Ecken; [208].

Die 1889 von HERMANN ZIMMERMANN⁷⁴ entworfene eiserne Reichstagskuppel in Berlin überspannte eine ca. 34 x 38 m große Öffnung. Der rechteckige Kuppelgrundriss erforderte eine differenzierte Auflagerung der Binder, um Ausdehnen und Zusammenziehen der Kuppel spannungsfrei zu gewährleisten. Abb. 51 veranschaulicht die Lagerungsbedingungen und die technische Umsetzung durch zweiseitig bewegliche Wälzlager, vierseitig bewegliche kombinierte Gleit-/Wälzlager sowie allseitig bewegliche Wälzlager in den Eckpunkten, wobei für die Rotationsfähigkeit der Kuppel jeweils Kugelzapfen in den Auflagerpunkten vorgesehen waren. Für die Anwendung von Kugelstelzen – sie sollten die allseitige Beweglichkeit in den Ecken gestatten – hat der Verfasser weder frühere bzw. noch weitere Beispiele nachweisen können⁷⁵. Die Kugelzapfen für die Rotationsfähigkeit hingegen wurden bereits eher in den Hochbau eingeführt. Möglicherweise steht der Neubau der Katholischen Schule in Dresden von 1881 für deren erste Anwendung [166/S.203].

Knapp anderthalb Jahrzehnte nach Errichtung der Reichstagskuppel öffnete im Dezember 1912 in Breslau die Jahrhunderthalle – ein Bau, der in vielerlei Hinsicht Maßstäbe setzte. Der komplett aus Eisenbeton errichtete Baukörper wurde an entscheidender Stelle zwischen Kuppel und Unterbau entkoppelt und die ca. 65 m spannende Kuppel dem Unterbau wie ein Deckel aufgesetzt. 32 radial angeordnete Kipplager ermöglichten die vom Unterbau unabhängige Reaktion der Rippenkuppel auf Temperaturveränderungen. Auf Grund des kreisförmigen Grundrisses entstanden in den Apsidenbereichen hohe waagerechte Kräfte, die durch ein System von Strebebögen aufgenommen werden mussten. Letztere wiederum trennten Kipplager vom angrenzenden Tragwerk (Abb. 52).

⁷⁴ HERMANN ZIMMERMANN (1845-1935).

⁷⁵ Interessanterweise wurde 1942 für allseitig bewegliche Lager auf Kugelstelzen ein Patent erteilt [K9 - 21].

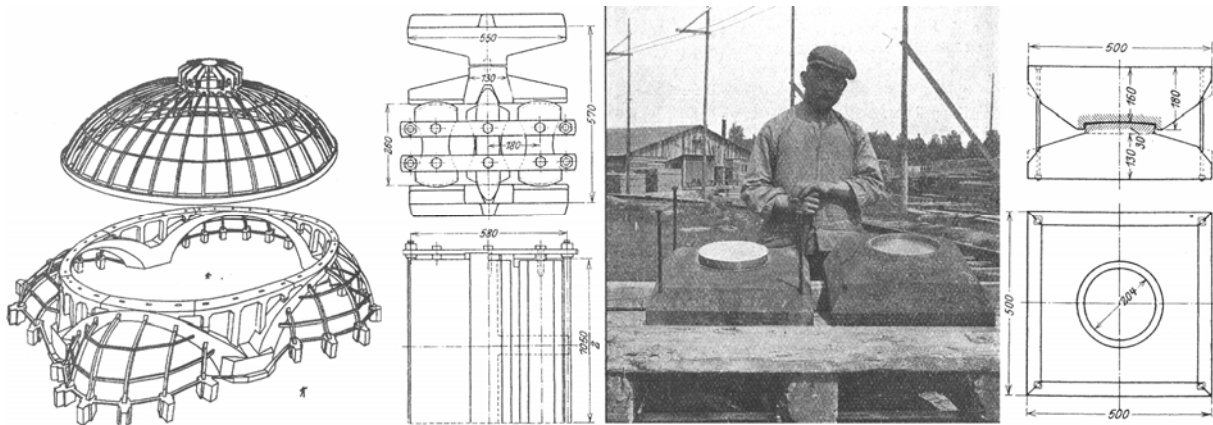


Abb. 52: Jahrhunderthalle Breslau; Von Links nach Rechts: Innere Tragstruktur [218], Linien-Kipplager der Kuppel, Punkt-Kipplager der Strebebögen als Foto und Prinzipskizze; [256]

Bei aller Innovation entstanden noch Konstruktionen, die auf reinen Flächenlagern ruhten (Abb. 53). Der Rückgriff auf diese im Brückenbau zur Jahrhundertwende längst veralteten Lager war durch das Tragverhalten unter Belastung begründet. Schnee und Wind als die wesentlichen Verkehrslasten erzwangen gewöhnlich keine Verformungen des Dachtragwerks in Qualität und Quantität, wie sie für große Brückenbauten üblich waren. Lager an Dachtragwerken sollten hauptsächlich die Dilatation infolge von Temperaturveränderungen ermöglichen. Eine Fixierung des theoretischen Auflagerpunktes durch eine Kippvorrichtung war demnach nicht zwingend erforderlich.

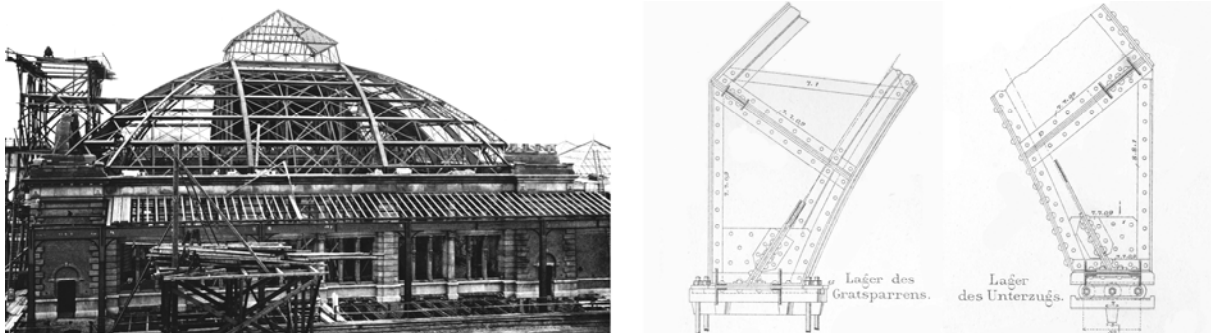


Abb. 53: Eiserne Kuppel des Bahnhofs in Halle a.S. im Bau, um 1890; Links: Ansicht, Rechts: Lagerdetails; [180]

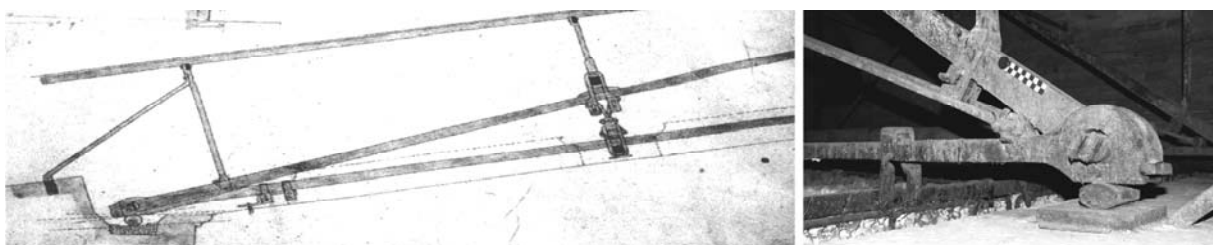


Abb. 54: Einrollenlager der Walhalla [197/S.59] und im Detail [517]

Insgesamt gesehen erfolgte die Entwicklung der Lagertechnik weitgehend zeitlich parallel im Brücken- und Hochbau. In beiden Bereichen gab es jedoch auch Anwendungen, die ihrer Zeit voraus waren. Für Innovationen im Hochbau seien die Lager am Dachstuhl der Walhalla bei Regensburg angeführt, die in den Jahren von 1830 bis 1842 nach dem Entwurf LEO VON KLENZES⁷⁶ gebaut wurde.

Abb. 54 lässt deutlich die Einrollenlager erkennen, die zum Ausgleich von Temperaturbewegungen an den Auflagerpunkten der Binder vorgesehen wurden [197/S.58f]⁷⁷. Im Zusammenhang dieser Arbeit sind die Walhalla-Lager zumindest in zweierlei Hinsicht interessant: Erstens sind dies die frühesten Rollenlager, die der Verfasser im Verlauf seiner Recherche zu Lagern hat nachweisen können. Auch im Brückenbau finden sich keine früheren Exemplare. Damit gehören die Walhalla-Lager mit Sicherheit zu den ersten Beispielen, an denen Rollenlager zum Ausgleich von Temperaturbewegungen verwirklicht wurden. Zweitens wurden die Lager als Einrollenlager ausgeführt. Diese Idee wurde erst viele Jahrzehnte später im Hoch- und Brückenbau wieder aufgegriffen.

Vor diesem Hintergrund wäre es interessant zu erfahren, wer den Anstoß zum Einbau dieser Lager gab. Kam die Idee bereits von den Entwurfsverfassern – für den Entwurf des Dachtragwerks zeichneten KLENZE und der Hofbauinspektor MEYER verantwortlich⁷⁸? Oder kam der Anstoß von der Ausführungsseite, wo mit MANNHARDT⁷⁹ und WERDER zwei Meister ihres Faches mit der Ausführung des eisernen Tragwerks betraut waren⁸⁰? LORENZ/ROHDE vermuten 2001 bei ihrer Analyse des Dachstuhls, dass die Detailplanungen zum Dachtragwerk wohl von MANNHARDT stammen, lassen aber offen, wer den Anstoß für den Einbau der Lager gab und schließen dabei KLENZE explizit nicht aus [197/S.69f]. Vielleicht können zukünftige Untersuchungen hier weiter Aufschluss geben. Es lässt sich festhalten, dass Einrollenlager nach Kenntnis des Verfassers erstmals im Hochbau eingesetzt wurden. Im Brückenbau sollten sie praktisch erst nach 1920 – also viele Jahrzehnte später – als gepanzerte Betonrollenlager weite Verwendung finden (vgl. Abschnitt 4.3.3 und Abb. 22 auf S.27).

⁷⁶ LEO VON KLENZE (1784-1864).

⁷⁷ Im Kontext dieser Arbeit ist es irrelevant, dass die abgeflachte Form der Wälzkörper nicht der geometrisch exakten Form von Einrollenlagern entsprach und zu Imperfektionen führen musste, da Trägerlängsbewegungen zu Hebungen und Senkungen derselben führten. Interessanterweise wurde ein solch abgeflachtes Lager 1899 für Brückenbauten empfohlen [61]. Es wurde wegen genannter Nachteile jedoch andernorts kritisiert [16].

⁷⁸ Siehe dazu in [526/S.7], [503/S.150].

⁷⁹ JOHANN M. MANNHARDT (1798-1878).

⁸⁰ Zu MANNHARDT siehe in [517], zu WERDER in [503], zur Fertigungsstätte des Walhalla-Dachstuhls in [501].

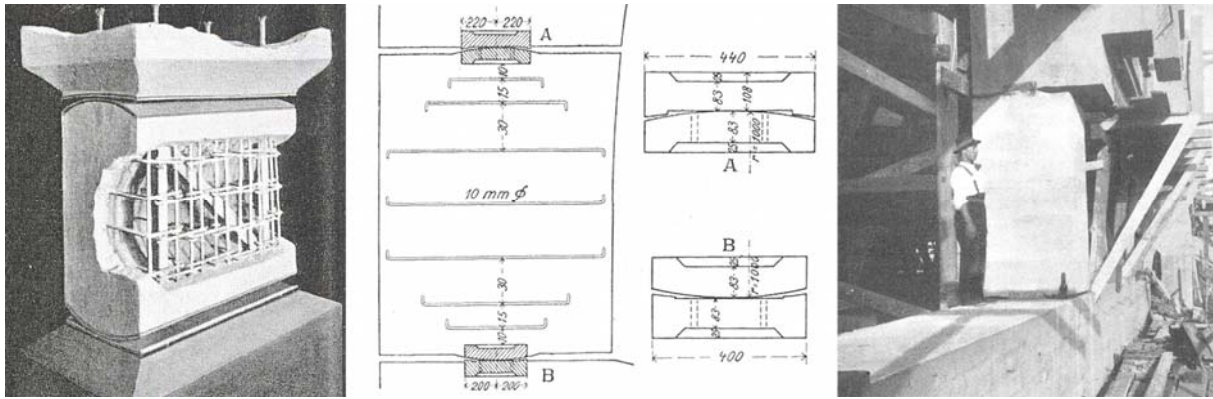


Abb. 55: Bewehrte Betonstelzen; Links: „Burkhardt-Pendellager“ [664], Mitte/Rechts: Auflager der Querbahnsteighalle am Hauptbahnhof Leipzig, Konstruktionsskizze und Ansicht der Betonstelze [152]

Neben den gepanzerten Betonrollenlagern besaßen auch die mit ihnen verwandten gepanzerten Betonstelzen ihre Vorläufer im Hochbau. GEHLER⁸¹ sah bereits beim Bau des Hauptbahnhofes in Leipzig (1909-1915) „[...] Rollenlager aus Eisenbeton mit einer Höhe von 2 m“ [152/S.73] vor. Mit ihren aus Stahlguss bewehrten Wälzflächen nahmen sie prinzipiell das Konstruktionsmuster der gepanzerten Betonstelzen vorweg, die ab ca. 1930 als „Burkhardt-Pendellager“ im Brückenbau weite Verbreitung fanden (Abb. 55).

Während bei den letztgenannten Beispielen die Innovation im Hochbau lag, so waren umgekehrt die im Punkt 4.3.4 bereits vorgestellten Verformungslager der Saalebrücke bei Grizehna von ca. 1853 konkurrenzlos ihrer Zeit voraus, fand doch selbst die weite Anwendung im Brückenbau erst nach dem Zweiten Weltkrieg statt. Heute hingegen ist der Hochbau weltweit das vorherrschende Marktsegment für Elastomerlager [660]. Eine besondere Anwendung stellt dabei die Gebäudesicherung gegen Erschütterungen dar [660]. Die wohl erste Hochhaussicherung gegen Erdbeben mit Elastomerlagern fand um 1970 am Telekommunikationscenter in Teheran⁸² statt [648]. Gleichwohl hat die schwingungsdämpfende Gründung von Hochbauten eine lange Tradition. Bereits beim Shell-Haus in Berlin (1930-32) nutzte GERHARD MENSCH⁸³ so genannte Antivibratplatten aus imprägniertem elastischen Gewebe, um das Stahlskelett des Gebäudes von den Erschütterungen der nahe liegenden Straße zu entkoppeln [572/S.60] (Abb. 56).

⁸¹ WILLY GEHLER (1876-1953).

⁸² Da Teheran auf einer Schotterterasse liegt – ein Baugrund, der normalerweise keine größeren bebenresistenten Bauwerke erlaubt – wurde das 70 m hohe Gebäude mit einer Grundfläche von 17,5 x 130 m vollständig auf GUMBA-Elastomerlager gelagert [661].

⁸³ GERHARD MENSCH (1880-1940).

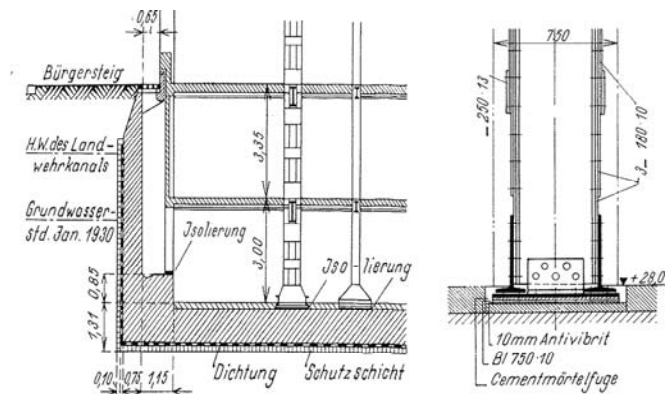


Abb. 56: Shell-Haus in Berlin; Links: Ansicht [142], Mitte: Prinzip der Isolierung des Gebäudes gegen Erschütterungen aus Straßenverkehr, Rechts: konstruktive Durchbildung des Stützenfußes [207]

Ein interessantes und über die übliche Anwendung im Hochbau hinausgehendes Einsatzgebiet fand das Prinzip der gusseisernen und stählernen Lager seit dem frühen 20. Jahrhundert beim Bau von Funktürmen bzw. von Sendemasten, um die Fußpunkte der Türme bzw. Masten von den Fundamenten zu entkoppeln. Da der Hauptgrund dafür die im Bereich der Funktechnik bei stählernen Konstruktionen geforderte Isolierung vom Erdreich war, fertigte man Teile des Lagers aus Porzellan. Abb. 57 zeigt den Fußpunkt eines Sendemastes in Berlin von 1926, gelagert

„[...] auf einer Kalotte mit einem Durchmesser von 150 mm [...]. Der Porzellandruckkörper [...] weist bei einer Beanspruchung von 267 kg/cm² eine 16,8 fache Bruchsicherheit auf“ [511/S.31].

Leider fehlt in der angegebenen Quelle ein Detail des Fußpunktes. Wie man sich einen solchen aber prinzipiell vorstellen kann, verrät in Ansätzen die Aufnahme eines bei Sturm umgestürzten Antennenmastes in folgender Abbildung.

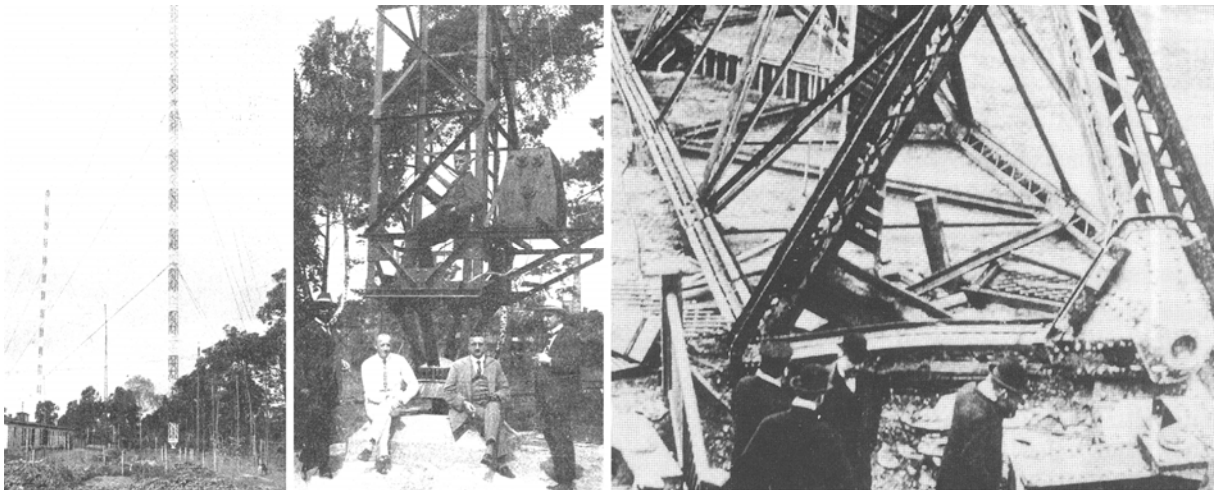


Abb. 57: Sendemast Berlin-Adlershof; Links/Mitte: Ansicht und Fußpunkt [511], Rechts: Der 1912 durch Sturm umgestürzte Antennenmast der Sendeanlage Nauen gewährt Blick auf die Ausbildung des Kontaktkörpers [493]

SCHÖNHÖFER nahm 1952 in *Neugestaltungen auf dem Gebiet des Auflagerbaues und auf verwandten Gebieten* explizit Bezug auf dieses Anwendungsgebiet in der Elektrotechnik, wo Porzellan

„[...] bereits zu Auflagerkörpern wegen seiner Isolierfähigkeit verwandt worden ist. Erwähnt seien die Auflagerkörper [...] für hohe Antennen, insbesondere Funktürme. Soweit bekannt geworden, hat sich das Porzellan für diese Zwecke vorzüglich bewährt“ [86/S.113].

Die guten Erfahrungen mit Porzellan im genannten Einsatzfeld – vor allem aber die hervorragende Qualität des technischen Porzellans⁸⁴ veranlassten SCHÖNHÖFER nach dem Zweiten Weltkrieg, das Porzellan auch für Auflager im Bauwesen zu empfehlen. Bezüglich der Festigkeitswerte war Porzellan mit den üblichen Lagermaterialien wie Stahlguss oder Schmiedestahl vergleichbar, oft sogar besser. Kombiniert mit seiner Verfügbarkeit, dem Widerstand gegen Stoßeinwirkungen, seiner Wartungsfreiheit und Unempfindlichkeit gegen Nässe und chemische Beanspruchung war es für SCHÖNHÖFER umso erstaunlicher, dass Porzellan sich nicht längst schon als hochwertiger Ersatz für Stahl im Auflagerbau etabliert hatte. Seine Bemühungen, die Porzellanindustrie für dieses Aufgabenfeld im Bauwesen zu gewinnen, blieben aber erfolglos [86/S.112ff].

4.5 Zusammenfassung

Die Aufgaben der frühen Brückenlager waren noch einfacher Natur, z.B. die trockene Lagerung des Überbaus, Lastverteilung, Dämpfung, o.ä. Einfache hölzerne Schwellen genügten lange diesen Ansprüchen. Angewendet bis weit hinein ins 19. Jahrhundert müssen sie als erste Generation von Brückenlagern gelten.

Die Einführung der gusseisernen und stählernen Lagergeneration ging einher mit der Verwendung des Eisens für den Bau von Brücken, womit sich neue, bis dato ungeahnte Dimensionen dem Brückenbau eröffneten. Diese wiederum verlangten auch ein neues Denken der Ingenieure, denn bald zeigten sich die Grenzen herkömmlicher Konstruktionsmethoden. Bewegungen der eisernen Überbauten wurden nicht mehr als ungeliebte und möglichst zu unterdrückende Begleiterscheinung verstanden, sondern als selbstverständlicher Teil beim Konstruieren mit Eisen gezielt zugelassen. Walzen, Bolzen, Zapfen entwickelten sich innerhalb weniger Jahre zum charakterisierenden Bestandteil der neuen Lagertechnik. Diese

⁸⁴ Porzellan besteht im Wesentlichen aus Kaolin, Quarz und Feldspat. Man unterscheidet zwischen Weichporzellan (für künstlerische Zwecke, Geschirr, o.ä.) mit 45% Quarz, 30% Feldspat, 25% Kaolin und Hartporzellan (für technische Zwecke) mit 35...65% Kaolin, 15...25% Quarz, 20...40% Feldspat; [639/S.127].

zweite Lagergeneration wurde zum Spiegel eines neuen Denkens. Das Ziel war die Beweglichkeit des Tragwerks, erst nur in Brückenlängsrichtung, später auch in Querrichtung, je mehr desto besser. Teilweise verzichtete man gänzlich auf ein festes Lager⁸⁵.

Die Entwicklung dieser Generation war im Wesentlichen zum Ende des 19. Jahrhunderts abgeschlossen, sie sollte jedoch bis nach dem Zweiten Weltkrieg zum Standardrepertoire im Brückenbau gehören. Die Neuerungen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren Übergangslösungen, die sich nicht dauerhaft im Brückenbau etablieren konnten. So zum Beispiel brachte die aufkommende Eisenbetonbauweise bewehrte Betonlager hervor, der Entwicklung hochfester Stähle entsprangen die „hochgezüchteten“ Lagerarten. Aus welchem Material auch immer, diese „Zwischenlösungen“ müssen als Fortschreibung der zweiten Lagergeneration gesehen werden. Ohne eine eigene spezifische Konstruktionsprache versuchten sie, das Prinzip der nunmehr alten stählernen Lager mit vermeintlich besserem oder preiswerterem Material umzusetzen.

Erst die Anwendung von Kunststoffen wie Gummi und Teflon ermöglichte eine neue, dritte Generation von Brückenlagern, die noch aktuell verwendet wird. Nach dem „Gleiten“, „Rollen“ und „Kippen“ der Vorgänger wird jetzt die „Deformation“ als weitere Möglichkeit zum Ausgleich von Bewegungsdifferenzen genutzt. So sind die Verformungslager auch das Kennzeichen dieser Generation. Zusammen mit Teflon als „Gleitpartner“ revolutionierten sie die Lagertechnik.

Rückblickend fällt auf, dass die beiden „großen“ Lagergenerationen des industriellen Zeitalters in Zeiten wirtschaftlichen Aufschwungs entstanden. Stellten die Entwicklungen im Eisenbahnbau die Voraussetzungen für die eisernen Lager, so brachte der dynamische Ausbau des Straßennetzes in den Nachkriegsjahren die Kunststofflager hervor. Vielleicht schafft erst ein neues Netz von Verkehrswegen die Notwendigkeit einer vierten Lagergeneration – eventuell mit ganz neuen, besseren Materialien, vielleicht aber auch als Null-Lösung, mit einem gänzlichen Verzicht auf Lager.

Die Übersicht 1 in der Anlage zu dieser Arbeit fasst die wesentlichen Schritte bei der Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlager zusammen.

⁸⁵ Siehe dazu in [108/S.256], [131 /S.284], [236/S.498].

5 Gusseiserne und stählerne Brückenlager in Deutschland

In dieser Arbeit stehen die gusseisernen und stählernen Brückenlager im Mittelpunkt. Wenngleich dabei der Blick für das internationale Umfeld nicht verloren gehen soll, bildet die Entwicklung in Deutschland bzw. im deutschsprachigen Raum doch den Kern der Untersuchungen. Das folgende Kapitel „Kontext“ soll zunächst einige wichtige Hintergründe skizzieren, warum ab ca. 1850 die Impulse zu statisch-konstruktiven Fragen des Brückenbaus und damit auch zur Lagerentwicklung in erster Linie aus Deutschland kamen.

5.1 Kontext

Die Mitte des 19. Jahrhunderts war für Deutschland in vielerlei Hinsicht eine Epoche gravierender Veränderungen. Ungeachtet der politischen Unruhen erfasste die Industrialisierung Deutschland mit ihrer ganzen Kraft. Zwar war schon 1835 der erste Eisenbahnzug zwischen Nürnberg und Fürth gefahren, verglichen mit Großbritannien war Deutschland zu jener Zeit aber noch ein rückständiges Agrarland, gebeutelt von politischer und wirtschaftlicher Zersplittertheit, beispielsweise mit unterschiedlichen Maß- und Gewichtssystemen – eine gemeinsame Uhrzeit wurde erst 1893 eingeführt⁸⁶.

Ergebnis dieser den industriellen Fortschritt hemmenden Bedingungen war auch die – verglichen mit England und Frankreich – späte Einführung des Eisens in das Bauwesen. So zählten in Deutschland noch um 1850 eiserne Dächer zu den gewagten Konstruktionen [275/S.159], und noch 1846 hatte RÖDER in seiner *Brückenbaukunde* einer ganzen Generation angehender Ingenieure prophezeit, sie werde „[...] wohl schwerlich so bald in den Fall [...] kommen, eine eiserne Brücke bauen zu sollen“ [231/S.244]. Genau diese Generation aber sollte maßgeblich daran beteiligt werden, in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts das Netz der deutschen Eisenbahn von 2300 km (1845) auf ca. 60 000 km (um 1900) [577/S.29] auszubauen und dafür etwa 12 000 eiserne Brücken [267/S.465] zu errichten.

Die Weichen für diese um 1850 in Deutschland einsetzende Dynamik im Bau eiserner Brücken waren bereits im Vorfeld gestellt worden. Einerseits schuf die bürgerliche Revolution von 1848 erst politische Rahmenbedingungen, die den gewaltigen Aufschwung des Kapitalismus in Deutschland und damit die volle Entfaltung der Industriellen Revolution ermöglichten.

⁸⁶ Einen informativen historischen Überblick gibt [495]. Die Hintergründe der Verzögerung der Industriellen Revolution in Deutschland gegenüber England, Frankreich, Belgien und der Schweiz legt MOTTEK in [549/S.76] dar.

ten. Andererseits ebneten soziale Entwicklungen und Interaktionen zwischen den Sektoren Industrie, Wissenschaft und Verwaltung, die sich in den Jahrzehnten zuvor zugetragen hatten, den Weg für die nach der Jahrhundertmitte zügige Einführung von Eisen im Bauwesen⁸⁷.

5.1.1 Wissenschaftliche und industrielle Emanzipation

Ein wichtiger Faktor für diesen Prozess war von den Verwaltungen in den Ländern des späteren Deutschen Reichs schon etwa um 1800 installiert worden. Die staatliche Förderung von Gewerbe und Industrie wurde verknüpft mit Bildungsreformen, die von einem wirtschaftsliberalen Beamtentum vorangetrieben wurde. Maßgeblich an dieser Entwicklung beteiligt war der preußische Ministerialbeamte BEUTH⁸⁸, der seine Ideen bündig so artikulierte: „Der Gewerbefleiß ist die Grundlage der Nationalkraft!“ [576/S.125]. Zum Stellenwert der Nachwuchsförderung innerhalb der Industrie- und Gewerbeförderung betonte 1818 der preußische Staatsrat und Direktor der Generalverwaltung für Handel und Gewerbe KUNTH⁸⁹:

„Gegenüber der Gefahr, durch die Anstrengungen anderer Fabrikländer immer enger beschränkt zu werden, [...] ist die Hülfe, welche von Staatswegen geleistet werden kann, in dem einzigen Wort begriffen: Bildung!“ [543/S.17].

So sorgten dann auch die im frühen 19. Jahrhundert eingerichteten Polytechnischen Lehranstalten und Gewerbeschulen für eine Verflechtung von Theorie und Praxis [574/S.130]. Diese Institute richteten sich an die Söhne von Fabrikanten, Handelsleuten, Technikern und sonstigen Gewerbetreibenden, ausgerichtet auf Nutzen, Anwendung und praktische Verwirklichung technisch-wissenschaftlicher Erkenntnis⁹⁰. „Wo die Wissenschaft nicht in die Gewerbe eingeführt ist, da gibt es kein sicher gegründetes Gewerbe, da gibt es kein Fortschreiten“ [543/S.18], so erklärte BEUTH die Wissenschaft zur Grundlage des Fabrikwesens.

⁸⁷ Das von KURRER in [532] vorgestellte Modell der Triade (Verflechtung der gesellschaftlichen Sektoren Industrie, Wissenschaft und Verwaltung) ermöglichte in Deutschland in idealtypischer Form die schnelle Etablierung des Eisenbetons um 1900, in embryonaler Form jedoch schon ein halbes Jahrhundert vorher die rasante Einführung des Eisens in das Bauwesen.

⁸⁸ CHRISTIAN PETER WILHELM FRIEDRICH BEUTH (1781-1853).

⁸⁹ GOTTLÖB JOHANN CHRISTIAN KUNTH (1757-1829).

⁹⁰ Gründungsdaten von Gewerbeschulen, Polytechnischen Schulen und Technischen Hochschulen im deutschsprachigen Raum: 1806 Prag, 1815 Wien, 1821 Berlin, 1825 Karlsruhe, 1827 München, 1828 Dresden, 1829 Stuttgart, 1831 Hannover, 1835 Braunschweig, 1836 Darmstadt, 1855 Zürich, 1870 Aachen; [522/S.192]. Einen Überblick zur Gründung der Gewerbeinstitute liefert [576]. Zur Ausrichtung der Polytechnischen Institute sowie zu ihrer Abgrenzung von den Universitäten siehe [544].

Die mit diesem Bildungssystem einhergehenden Verflechtungen von Industrie und Wissenschaft führten 1856 zur Gründung des Vereins Deutscher Ingenieure, dessen wesentliche Aufgabe die weitere Förderung der Polytechnischen Schulen wurde. Aus diesem fruchtbaren Boden heraus konnte sich Deutschland in der zweiten Jahrhunderthälfte auf vielen Gebieten der Industrie und Technik von einem Import- zu einem Exportland entwickeln⁹¹.

Ein wesentlicher Erfolg dieser Bildungsreform war die wissenschaftliche Emanzipation Deutschlands von Frankreich. Noch zu Beginn des 19. Jahrhunderts hatte Paris als Metropole aller Wissenschaften gegolten, nicht zuletzt dank der 1794 noch als École de travaux publique gegründeten École Polytechnique. In Paris auch hatte sich die erste Generation der deutschen Naturwissenschaftler und Polytechniker des 19. Jahrhunderts Vorbilder und Anregungen geholt [544/S.254f]. Dem französischen System fehlte es jedoch an einer Verflechtung mit Industrie und Gewerbe. Die Ingenieurschulen lehrten zwar auf einem vor allem mathematisch hohen Niveau, jedoch fast keine praxisrelevanten Fächer [502/S.24]. Darüber hinaus waren sowohl die École Polytechnique als auch die weiterführenden Écoles d'applications fast ausschließlich militärischen Bedürfnissen unterworfen [538/S.12]. Aus der École des Ponts et Chaussées rekrutierte das Militär seine Ingenieure und der Staat seine Baubeamten. Für die frühindustriellen Firmen blieben diese Ausbildungsstätten jedoch ohne Bedeutung [522/S.196]⁹².

Auswirkungen auf die Wirtschaft und das Bauwesen Frankreichs konnten nicht ausbleiben. Bezug nehmend auf die von KURRER in [534] eingeführte Periodisierung und Binnengliederung der Baustatik, wurde noch deren gesamte Vorbereitungsperiode (1575-1825) maßgeblich durch französische Wissenschaftler, wie zum Beispiel LA HIRE⁹³, BÉLIDOR⁹⁴, PERRONET⁹⁵,

⁹¹ An den Technischen Hochschulen und ihren vielgestaltigen Vorgängerinstituten dürften bis 1900 ungefähr 50 000 Ingenieure ausgebildet worden sein [502/S.20]. Der Begriff „Ingenieur“ entsprach dabei bezüglich der Qualifikation noch nicht unserem heutigen Verständnis. Laut einer Auswertung in [502/S.18ff] stammte die sich erst im Kaiserreich als „Ingenieure“ formierende Berufsgruppe aus vier gesellschaftlichen Gruppen oder Ständen, aus dem Unternehmertum, Militär, Beamtentum und der qualifizierten Handwerkerschaft, letztere bis zur Reichsgründung die quantitativ stärkste – bestehend größtenteils aus Instrumentenmachern, Mühlenbauern, Schmieden, ergänzt durch Vorarbeiter aus der noch jungen Industrie. Hütten- und Werkmeister konnten z.B. auch als „Ingenieur“ geführt werden. Bezüglich ihrer Ausbildung ist eine Auswertung von 651 in der VDI-Zeitschrift erschienenen Nachrufen von „Ingenieuren“ interessant, die zwischen 1800 und 1890 geboren wurden. Danach wiesen nur 12% eine vollakademische Ausbildung und 26% eine zumindest höhere technische Ausbildung mit Vollabitur auf.

⁹² Einen guten Überblick über die verschiedenen Ausbildungssysteme in England, Frankreich und Deutschland gibt [539/z.B. S.40ff].

⁹³ PHILIPPE DE LA HIRE (1640-1718).

⁹⁴ BERNARD FOREST DE BÉLIDOR (1697/98 – 1761).

⁹⁵ JEAN-RODOLPHE PERRONET (1708-1794).

COULOMB⁹⁶, geprägt. Zudem beeinflussten Franzosen wie LAMÉ⁹⁷, SAINT-VENANT⁹⁸, CLAPEYRON⁹⁹ und schließlich NAVIER¹⁰⁰ noch ganz wesentlich die erste Phase – die Konstituierungsphase – der Disziplinbildungsperiode (1825-1900). Die Etablierungsphase und Vollendungsphase dieser Periode jedoch – also die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts – sollten maßgeblich Deutsche wie CULMANN, SCHWEDLER³⁴, RITTER¹⁰¹, WINKLER⁴, ZIMMERMANN⁷⁴, MOHR¹⁰², MEHRTENS¹⁰³, WEYRAUCH¹⁰⁴, MÜLLER-BRESLAU¹⁰⁵, FÖPPL¹⁰⁶, u.v.m. bestimmen¹⁰⁷. Auch auf dieser, der technikwissenschaftlichen Ebene, hatte sich Deutschland in der zweiten Jahrhunderthälfte zu einem Exportland entwickelt. So verwundert nicht, dass der Eiffelturm – 1889 Wahrzeichen der Pariser Weltausstellung – von KOEHLIN¹⁰⁸ nach den Methoden der von Culmann formulierten graphischen Statik berechnet wurde.

Eine für die industrielle Entwicklung Deutschlands entscheidende Voraussetzung war die Gründung des Deutschen Zollvereins 1834¹⁰⁹ und damit die Schaffung einer inländischen Freihandelszone gewesen. Darüber hinaus schützte ab 1844 ein Schutzzoll für Roh- und Walzeisen den deutschen Markt vor einer Überschwemmung mit englischem und belgischem Eisen und schaffte damit die Voraussetzung für den rapiden Aufschwung der deutschen Eisenindustrie. Schon wenig später – 1851 bei der ersten Weltausstellung in London – musste sich England, die eigentliche Hochburg der Stahlherstellung, mit zweiten Preisen begnügen. Die höchste Auszeichnung ging nach Deutschland an KRUPP¹¹⁰ „[...] für Gussstahl ausgezeichneter Qualität mit Nachweisung neuer Anwendung“ [553/S.559]. Auch bezüglich des für Brückenbauten so wichtigen Puddelstahls konnten die deutschen Aussteller

⁹⁶ CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB (1736-1806).

⁹⁷ GABRIEL LAME (1795-1870).

⁹⁸ ADHÉMAR JEAN CLAUDE BARRÉ DE SAINT-VENANT (1797-1886).

⁹⁹ BENOIT-PIERRE-EMILE CLAPEYRON (1799-1864).

¹⁰⁰ CLAUDE-LOUIS-MARIE-HENRI NAVIER (1785-1836).

¹⁰¹ AUGUST RITTER (1826-1908).

¹⁰² OTTO MOHR (1835-1918).

¹⁰³ GEORG CHRISTOPH MEHRTENS (1843-1917).

¹⁰⁴ JAKOB JOHANN VON WEYRAUCH (1845-1917).

¹⁰⁵ HEINRICH MÜLLER-BRESLAU (1851-1925).

¹⁰⁶ AUGUST FÖPPL (1854-1924).

¹⁰⁷ Einen schnellen Überblick zu den Protagonisten erlaubt die biographische Zusammenstellung in [534].

¹⁰⁸ MAURICE KOEHLIN (1856-1946).

¹⁰⁹ Am 1. Januar 1834 tritt der Zollverein zwischen Preußen, Bayern, Württemberg, Sachsen und weiteren deutschen Staaten in Kraft. Ein großes Wirtschaftsgebiet mit mehr als 23 Mio. Menschen wird zusammengefasst und dem Absatz der deutschen Industrieerzeugnisse freigegeben [553].

¹¹⁰ ALFRED KRUPP (1812-1887).

mit Spitzenleistungen glänzen [553/S.559]. Damit demonstrierte die deutsche Eisenindustrie in London, endlich Anschluss an das Weltniveau erreicht zu haben¹¹¹. Fortan sollte sie maßgeblich und selbstbewusst den metallurgischen Fortschritt mitbestimmen – versinnbildlicht im rasanten Aufstieg des Unternehmens KRUPP zu einem schwerindustriellen Zentrum des europäischen Kontinents. Die Industrienation England jedoch war dabei, ihre Vormachtstellung einzubüßen. Bereits ein Jahr nach der Weltausstellung in London hieß es aus Regierungskreisen:

„So gewiss, wie die Dunkelheit dem Sonnenuntergang folgt, so gewiss wird England als Industrienation ins zweite Glied treten, so lange, bis die Industrie eine größere Vertrautheit mit der Wissenschaft erlangt, als sie gegenwärtig besitzt“ [522/S.148].

Die polytechnischen Anstalten als Kern der Bildungspolitik sowie der Zollverein als Kern der Wirtschaftspolitik haben – wie TREUE 1964 bei seiner Analyse der Bedeutung der Hochschulen für die Wirtschaft feststellte – „[...] Großartiges, entscheidend Wichtiges geleistet [...] für den immer schnelleren Aufstieg Deutschlands, dafür, dass Preußen-Deutschland um 1860 so sehr eine Wirtschafts- wie [...] Wissenschaftsmacht ersten Ranges war“ [575/S.226].

5.1.2 Auswirkungen im Brückenbau

Bis zur Jahrhundertmitte jedoch war Deutschland auch auf bautechnischem Gebiet noch weitgehend auf Wissensimport angewiesen, was eigentlich gut funktionierte. Einerseits wirkten ausländische Ingenieure als Gutachter in Kontinentaleuropa, andererseits zog es angehende Ingenieure ebenso nach England wie werdende Künstler nach Italien. Neue Entwicklungen sollten am großen Vorbild England oder in Frankreich – aber auch in der Schweiz und Nordamerika – studiert werden. PAULI zum Beispiel bereiste England und Irland (1843/44), LENTZE zog es nach Frankreich, England und Irland (1844/45, 1848 nochmals nach England) und CULMANN fuhr nach England und Nordamerika (1849/50), um nur einige zu nennen. Es gehörte dazu, die Reiseerlebnisse und -erfahrungen in einschlägigen Zeitschriften zu veröffentlichen und damit einem breiten Publikum verfügbar zu machen. So wur-

¹¹¹ Den genannten Leistungen war eine lange Entwicklung vorangegangen. Als Keimzellen des deutschen Hochofen- und Gießereibetriebs fungierten bereits seit dem späten Mittelalter Hüttenbetriebe unter anderem im Harz, Thüringen und Franken [330/S.2], doch bis weit in das 19. Jh. hinein beherrschten Holzkohle-Hochöfen das Geschehen. Mit Bezug zur Stahlherstellung hatte sich ab Mitte der 1820er-Jahre in Deutschland das englische Puddel- und Walzwerksverfahren eingebürgert, und durch viele technische Verbesserungen ab ca. 1830, wie die Erfindung des Heizgasbetriebes [553/S.558], konnte das deutsche Hüttenwesen im Weltmaßstab nach und nach aufholen.

den auch diejenigen Ingenieure im Hinblick auf die neuesten Entwicklungen auf dem Laufenden gehalten, die sich eine solche Studienreise nicht leisten konnten oder wollten.

Ein Besuch der Baustelle oder des fertigen Bauwerks der für ihre Zeit gigantischen Britannia-Brücke, fertiggestellt 1850, gehörte zur Jahrhundertmitte zum Pflichtprogramm eines jeden reisenden Ingenieurs, was auch in Deutschland zu einer Omnipräsenz der Brücke in zeitgenössischen Fachzeitschriften und -büchern führte und gleichzeitig die englische Vormachtstellung im eisernen Brückenbau noch weit in die zweite Jahrhunderthälfte nachhallen ließ. Die Britannia-Brücke stellte in vielerlei Hinsicht und zweifelsfrei einen Höhepunkt im Bau eiserner Brücken dar¹¹². An ihr offenbarten sich jedoch die Grenzen des weitgehend empirischen Vorgehens englischer Konstrukteure. So bedauerte CULMANN in seinem Reisebericht von 1852 bezüglich der im Vorfeld des Baus veranlassten und extrem aufwändigen Versuche zur Formfindung der „Röhre“ der Britannia-Brücke, dass diese

„[...] keinem theoretisch gebildeteren Ingenieur als FAIRBAIRN¹¹³ übertragen wurden, der, von allen bis jetzt durch die Wissenschaft geförderten Wahrheiten nichts wissend, erst durch die Versuche selbst sich belehren musste und auf diese Weise Mittel und Kräfte vergeudete, um zu erfahren, was längst in jedem Lehrbuch der Mechanik zu finden war“ [135/S.176].

Der mit dem Bauwerk erzielte technische Erfolg jedoch und die allgemeine Bewunderung auch in Kontinentaleuropa veranlasste England, für das Röhrensystem der Britannia-Brücke eine Serienfertigung für 100-200 Fuß Spannweite (30-60 m) aufzulegen, obwohl zu diesem Zeitpunkt längst effektivere Tragsysteme den Brückenbau revolutionierten [174/S.153]¹¹⁴.

Fast gleichzeitig belegte die bis 1857 errichtete Dirschauer Weichselbrücke, wie eine mit der Britannia-Brücke vergleichbare Stützweite mit deutlich geringerem Materialeinsatz überbrückt werden konnte. Natürlich hatte LENTZE für den Brückenentwurf der Weichselbrücke von den Erfahrungen an der Britannia-Brücke profitieren können – auch er hatte die Baustelle besucht [534/S.53]. Seine Erkenntnisse nutzte LENTZE jedoch hauptsächlich für eine Optimierung des Brückenentwurfs und weniger, um eine 1:1-Kopie der Britannia-Brücke entstehen zu lassen. Der Trägerquerschnitt musste nicht erst durch aufwändige Versuche vorher

¹¹² Mit Bezug auf das während der Entwurfs- und Bauphase generierte Wissen in technischer und statisch-konstruktiver Sicht siehe [562/z.B. S.38].

¹¹³ WILLIAM FAIRBAIRN (1789-1874).

¹¹⁴ Eine letzte großmaßstäbliche Anwendung sollte das System der Britannia-Brücke an der Victoria-Brücke über den St. Lorenz Strom bei Montreal (1854-1859) erfahren. Mit einer Gesamtlänge von mehr als 3 km (Rampenbauten sowie 24 Felder mit 74 m Spannweite und einem Mittelfeld mit 100 m Spannweite) war diese ROBERT STEPHENSONS letztes großes Ingenieurbauwerk [492/S.178ff].

ermittelt werden, sondern wurde aus theoretischen Überlegungen und Berechnungen abgeleitet [534/S.58]. Dieser Ansatz, der sich deutlich von der Konzeptionierung der Britannia-Bücke unterschied, war inzwischen möglich. Dank der ein halbes Jahrhundert vorher eingeleiteten Reform des höheren technischen Schulwesens stand eine gut ausgebildete Generation von Ingenieuren bereit, die sich gern den neuen Herausforderungen im Eisenbrückenbau stellte. Zudem war dieser Weg in Deutschland aber auch wirtschaftlich notwendig, wie REDTENBACHER¹¹⁵ 1858 mit Blick auf England unterstrich:

„Wir auf dem Kontinent haben weder die Geldkräfte noch diesen Umfang an Erfahrungen in der Ausführung aller Spezialitäten, um den rein empirischen Weg ausschließlich verfolgen zu können, und sind daher gezwungen, durch intelligente Kraft und wissenschaftliche Einsicht das mangelnde Geld und die eingeschränkte Erfahrung zu ersetzen oder zu unterstützen“ [575/S.227].

Wenngleich der Übergang von empirisch geprägter zur wissenschaftlich fundierten Bauingenieurkunst weder zeitlich noch örtlich an lediglich zwei Bauwerken festgemacht werden kann, so symbolisieren doch beide Brücken zur Jahrhundertmitte diesen Wendepunkt im bautechnischen Schaffen (Abb. 58)¹¹⁶.

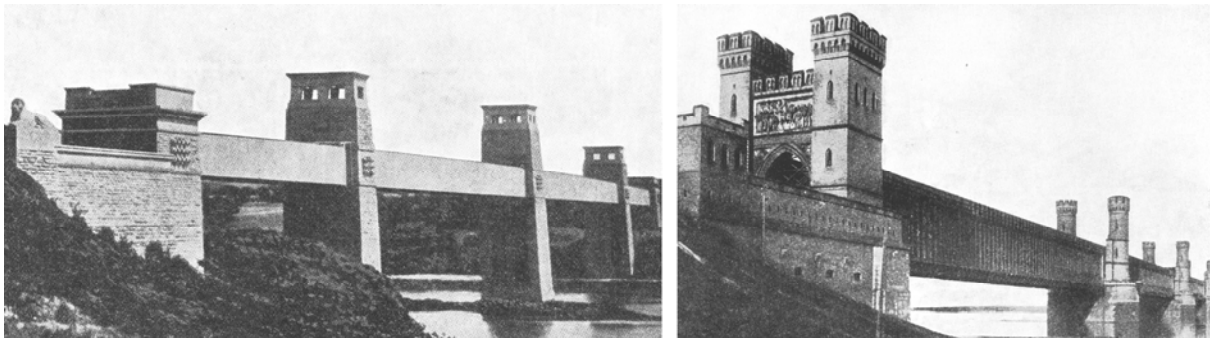


Abb. 58: Die Britannia- (links) und Weichselbrücke (rechts) im Vergleich; [509]

5.1.3 Einfluss auf Brückentheorie und -konstruktion

Ein halbes Jahrhundert später, um 1900, konnte RIEPPEL¹¹⁷ auf die Entwicklung des Eisenbrückenbaus für Deutschland positiv zurückblicken. Danach waren zwar die Bauwerke mit großen Spannweiten – den topographischen Verhältnissen geschuldet – in Nordamerika, England und Frankreich entstanden; die deutsche Brückenbautechnik aber habe...

¹¹⁵ JAKOB FERDINAND REDTENBACHER (1809-1863).

¹¹⁶ Eine Ingenieurausbildung an Hochschulen wurde in Großbritannien nur sehr zögerlich etabliert. Die ersten Ansätze einer schulischen Ingenieurausbildung werden ausführlich in [488/149ff] beschrieben.

¹¹⁷ ANTON VON RIEPPEL (1852-1926).

„[...] die ihr gestellten kleineren Aufgaben benutzt, um die theoretische und konstruktive Durchbildung der Brückenträger in so gründlicher Weise zu vervollkommen, dass sie [...] darin gegen kein anderes Land zurücksteht“ [228/S.562].

Diese Perfektionierung des Systems „Brücke“, die Entwicklung leichter und kühner Tragwerke bei geringem Materialeinsatz, hatte die konsequente Umsetzung der bei der Berechnung angesetzten theoretischen Annahmen am realen Bauwerk eingefordert, um Nebenspannungen möglichst auszuschließen. In diesem Kontext sind sowohl die von Deutschland ausgehende peinlich genaue Knotenpunktausbildung von Fachwerkträgern, die sukzessive Anpassung der Auflagerbedingungen sowie das Bestreben nach Systemoptimierung zu verstehen.

Die Brücken des für seine Innovationen im Brückenbau bekannten CLAUS KÖPKE eignen sich wohl am besten, um durch Beispiele die Suche nach leistungsfähigen Tragwerken im ausgehenden 19. Jahrhundert zu skizzieren. KÖPKE gehörte zu den schöpferischen Stahlbrückenbauern seiner Zeit. Über die auf ihn zurückgehenden Steingelenke für Bogenbrücken ist bereits berichtet worden (Abb. 38 auf S.40), ebenso über die Pylonlager seiner wohl bekanntesten Brücke – der Elbebrücke „Blaues Wunder“ (Abb. 17 auf S.24). Letztere überrascht jedoch besonders durch ihr Gesamtsystem, welches wichtige Neuerungen gegenüber der üblichen Brückenbaupraxis barg¹¹⁸. Abb. 59 stellt die Idee KÖPKES für das Tragwerk¹¹⁹ und das daraus abgeleitete statische System einander gegenüber und verdeutlicht die Komplexität des Systems und der für das Bauwerk gewählten Auflagerbedingungen.

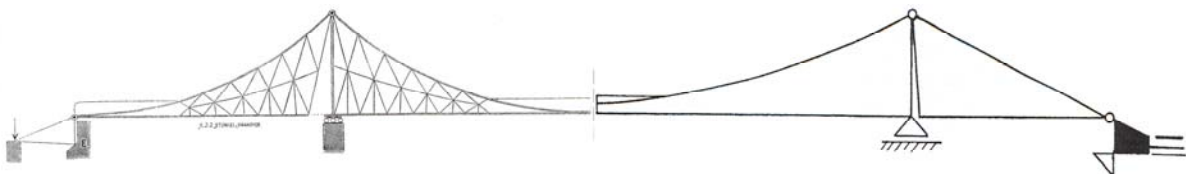


Abb. 59: Elbebrücke „Blaues Wunder“ Dresden: Linke Hälfte: KÖPKES Prinzip einer steifen Hängebrücke mit drei Gelenken [184], Rechte Hälfte: Statisches System nach [561]

¹¹⁸ „Diese Neuerungen sind hauptsächlich 1. die Verbindung der Pylonen mit den Trägerhälften der Hauptöffnung, 2. die Anwendung von Federn zu den Gelenken, 3. die Anbringung des Scheitelgelenks unter der Fahrbahn, 4. die kreuzweise Anordnung der Querträger, 5. die Anwendung von je mit 1500 t Schlacken und Roheisen belasteten Ankern zur Übertragung der Schubkräfte auf den Erdboden [...]“ [154/S.140].

¹¹⁹ KÖPKE hatte das Prinzip der Elbebrücke bereits 1888 veröffentlicht, also 3 Jahre vor dem Baubeginn.

Ebenso bemerkenswert ist die von KÖPKE geplante und 1877-78 errichtete Elbebrücke in Riesa (Abb. 60). Im Hinblick auf die Lagerungsbedingungen der Überbauten überraschte die über ein Hebelsystem an einem Ufer eingetragene Horizontalkraft, welche über die miteinander verbundenen und durchweg rollend gelagerten [158/S.553] Hauptträger bis zum anderen Elbeufer weitergeleitet wurde. Damit waren die Hauptträger-Untergurte unter Eigengewicht praktisch spannungslos¹²⁰ [561/494].



Abb. 60: Elbebrücke Riesa; Links: Ansicht [560], Rechts: Vorspannmechanismus [548]

KÖPKE konnte seine Hauptgedanken, über die er bereits in den 1860er-Jahren in der Fachpresse berichtet hatte¹²¹, durch Brückenbauten auch verwirklichen. Das war nicht jedem seiner Zeitgenossen vergönnt. Die Systeme AUGUST FÖPPLS, der Ergebnisse seiner Überlegungen in einer 1878 erschienenen Broschüre *Die neuen Träger-Systeme für eiserne Brücken* der Fachwelt vorstellte, wurden nach Kenntnis des Verfassers nirgendwo in einem Bauwerk realisiert. Abb. 61 zeigt von FÖPPL abgewandelte Formen des Dreigelenkbogen-Trägers¹²².

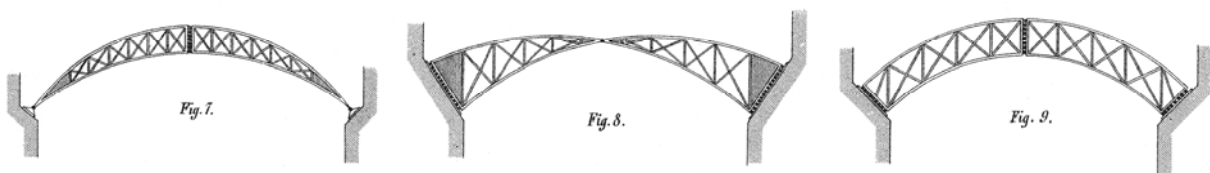


Abb. 61: Ausgewählte Vorschläge FÖPPLS für neue Trägersysteme im eisernen Brückenbau [505]

¹²⁰ Die Elbebrücke Riesa bestand aus zwei getrennten, nebeneinander liegenden Brückenzügen, der unterstromseitige führte zwei Eisenbahngleise, der oberstromseitige eine mehrspurige Straße. Das Bauwerk war in vielerlei Hinsicht bemerkenswert, z.B. durch die in ihr realisierte Idee der mitwirkenden Fahrbahn, welche – fast vergessen – erst in den dreißiger Jahren wiederentdeckt wurde, nachdem KÖPKE sie bereits an der „Eisenbahn-Hälfte“ in Riesa angewendet hatte [561/S.496]. Die im Text erwähnte Vorspannung der Untergurte wurde nur an der „Straßen-Hälfte“ ausgeführt [158]. Gut zwei Jahrzehnte später, 1901, erhielt GHIRA ein Patent für die Idee, am Auflager solche Kräfte in den Überbau einzutragen, die der Belastung aus Verkehr entgegenwirken [K9 - 8].

¹²¹ Über versteifte Hängebrücken hatte KÖPKE 1860 in [182] berichtet; den Gedanken von Balkenbrücken mit künstlichen Vorspannungen hatte er bereits 1864 in [183] formuliert.

¹²² Die Klassifizierung als Dreigelenkbogen rechtfertigt nach FÖPPL die Tatsache, „[...] dass die Anordnung eines Rollenlagers als ein unendlich fernes Gelenk betrachtet werden kann“ [505/S.15].

Wenngleich die genannten Beispiele keinen direkten Einfluss auf die Entwicklung der Brückenlagertechnik hatten, so verdeutlichten sie doch, auf welchem Niveau in Deutschland nach der Jahrhundertmitte Brückentragwerke gedacht, diskutiert und gebaut wurden, selbst wenn nicht alle Gedanken ihren Weg in die Brückenbaupraxis fanden. FÖPPLS Ideen zum Beispiel blieben weitgehend unbekannt. KÖPKEs Brücken sollten Einzelbeispiele bleiben, wobei seine Idee, die Tragfähigkeit durch Vorspannung zu erhöhen, noch heute die Praxis im Brückenbau entscheidend prägt. Andere Entwicklungen wiederum, wie GERBERS¹²³ Gelenkträger, wurden in die ganze Welt getragen.

Darüber hinaus veranschaulichten die gezeigten Beispiele den Stellenwert, den Brückenlager in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts innerhalb von Brückenbauwerken zunehmend einnahmen. KÖPKE zum Beispiel nutzte Lager und deren Eigenschaften, um das Verhalten des Überbaus aktiv zu beeinflussen. Für ihn waren Lager längst dem Status eines „notwendigen Übels“ entwachsen, das lediglich auf Vorgaben aus dem Überbau reagiert. Bei KÖPKE übernahmen Lager bei Bedarf einen agierenden Part innerhalb des Gesamtsystems „Brücke“. Und wenn FÖPPL 1878 Brückenlager als „Organe des Trägers“ [505/S.8] bezeichnet, veranschaulicht das umso mehr die den Brückenlagern seit den 1870er-Jahren zugeschriebene Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund verwundert es nicht, dass in dem im Abschnitt 4 skizzierten geschichtlichen Entwicklungsweg der Brückenlager die Impulse seit den 1850er-Jahren vornehmlich aus Deutschland kamen. Zur Situation in England und Frankreich kritisierte RIEPEL noch um 1900, wie wenig man dort „[...] diesem wichtigen Konstruktionsdetail [...] noch die gebührende Aufmerksamkeit schenkt. [...] Die deutschen Konstruktionen bürgern sich jedoch mehr und mehr ein“ [228/S.567]. Auch die Konstruktion der Brückenlager betreffend war Deutschland zu einem Exportland gereift.

Schließlich geben die Brückenlager ein eindrucksvolles Beispiel, wie die im 19. Jahrhundert in der deutschen Hochschullandschaft begründete Verflechtung von Theorie und Praxis bis heute nachwirken sollte. Es war der deutsche Physiker HEINRICH HERTZ¹²⁴, der das von ihm für elektrophysische Betrachtungen entwickelte Berechnungsmodell für allgemeinere praktische Zwecke anzuwenden versuchte. Um den Nutzwert seiner Erkenntnisse einem gewerblich-technisch interessierten Publikum zu unterbreiten [318/S.174], veröffentlichte er 1882

¹²³ HEINRICH GERBER (1832-1912).

¹²⁴ HEINRICH RUDOLF HERTZ (1857-1894).

seinen Berechnungsansatz „Über die Berührung fester elastischer Körper [...]“ in den *Verhandlungen* des von BEUTH 1821 angeregten Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes in Preußen [318] und legte damit die Grundlage für die im Bauwesen noch heute auch im internationalen Kontext übliche Berechnungsmethode für Kontaktspannungen – die so genannten HERTZ'schen Spannungen. Auch für die Berechnung der Brückenlager sollte also der entscheidende Impuls schließlich aus Deutschland kommen.

5.1.4 Entwicklungen in den Vereinigten Staaten von Amerika

Mit Bezug auf das außereuropäische Ausland soll die Entwicklung in den USA gesondert aufgezeigt werden. Hier erfuhr der Brückenbau in Eisen nach dem Bürgerkrieg 1861-65 eine ausgesprochene Dynamik. Allein in den Jahren von 1870 bis 1872 wurden ca. 35 000 km Bahntrasse mit den dazugehörigen Brücken gebaut¹²⁵. Zwischen 1868 und 1874 entstanden zum Beispiel nicht weniger als 12 Brücken über den Mississippi und weitere 8 über den Missouri [156/S.74]. In den sich anschließenden 100 Jahren bis 1970 erfuhr der technisch-industrielle Aufschwung in den USA praktisch keine Verlangsamung, und die Vereinigten Staaten ließen alle Konkurrenten hinter sich [522/S.151].

Die Ingenieurausbildung im 19. Jahrhundert entwickelte sich aus einer Mischung britischer und kontinentaleuropäischer Tradition. Der Bedarf an Militäringenieuren gab Anlass für die Gründung der United States Military Academy in West Point 1802, die dem französischen Vorbild der *École Polytechnique* nahe stand¹²⁶. Noch vor dem Bürgerkrieg entstanden eine Reihe nicht-militärischer Ingenieurschulen. In der britischen Tradition hingegen stand das System der Aneignung von Kenntnissen in der Praxis, wo Ingenieure durch technische Arbeit vor Ort, zum Beispiel auf größeren Baustellen, ausgebildet wurden [522/S.152ff].

Der steigende Bedarf an Ingenieuren ab den 1870er-Jahren führte zu einer veränderten Ingenieurausbildung, in der die schulische Lehre zur Norm wurde. Die Zahl der Ingenieurausbildungsstätten wuchs von weniger als 10 vor dem Bürgerkrieg, über 85 (um 1880) bis auf 180 im Jahre 1945. Um 1900 waren die USA zum größten Konkurrenten Deutschlands auf dem Weltmarkt geworden. Bildungsdurstige Ingenieure zog es auf ihren Reisen inzwischen immer mehr in die ehemalige Kolonie des einstigen Vorbilds England [522/S.162f].

¹²⁵ Zum Vergleich: um 1876 betrug nach [156/S.74] das gesamte Eisenbahnnetz in Großbritannien 26000 km und in Deutschland 25000 km.

¹²⁶ Der Aufgabenbereich der Akademie wurde erst 1812 auf die allgemeine Offiziersausbildung ausgeweitet [522/S.154].

Während sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts der Brückenbau in Eisen in den Ländern Europas im Großen und Ganzen ähnelte, so unterschied sich dieser deutlich von dem in Nordamerika. Vor allem hinsichtlich der Brückensysteme, der verwendeten Materialien und mit Bezug auf die Bauausführung gab es deutliche Unterschiede [222/S.497f]¹²⁷. Auch die Brückenlagertechnik bildete sich weitgehend losgelöst von Europa aus, wobei insgesamt der Wissenstransfer nach Amerika überwiegt. Als die Entwicklungsstränge um 1900 zusammenzufließen begannen, war die Ausbildung der gusseisernen und stählernen Brückenlager prinzipiell bereits abgeschlossen. Vor diesem Hintergrund werden die Aktivitäten zur Brückenlagertechnik in den USA in dieser Arbeit losgelöst vom europäischen Kontext aufgezeigt und in einem abschließenden Abschnitt 7 der Arbeit zusammengefasst.

5.1.5 Patente als Spiegel der Entwicklung

Die schon aufgezeigte Entwicklung soll durch eine Analyse der für Brückenlager erteilten Patente bekräftigt werden. Dieser Ansatz basiert auf der Überlegung, dass die mit einer Patentanmeldung üblicherweise verbundene Idee einer wirtschaftlichen Verwertung stets im Zusammenhang mit dem gesamten Innovationsprozess gesehen werden muss (Abb. 62). In diesem Prozess wird die Patentreife einer Idee gewöhnlich erst zwischen den Stadien „Entwicklung“ und „Anwendung“ – also erst vor der Markteinführung – erreicht. Vor diesem Hintergrund eignen sich Patentdaten auch als Rückschluss auf die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit zu einem bestimmten Thema [514/S.1].

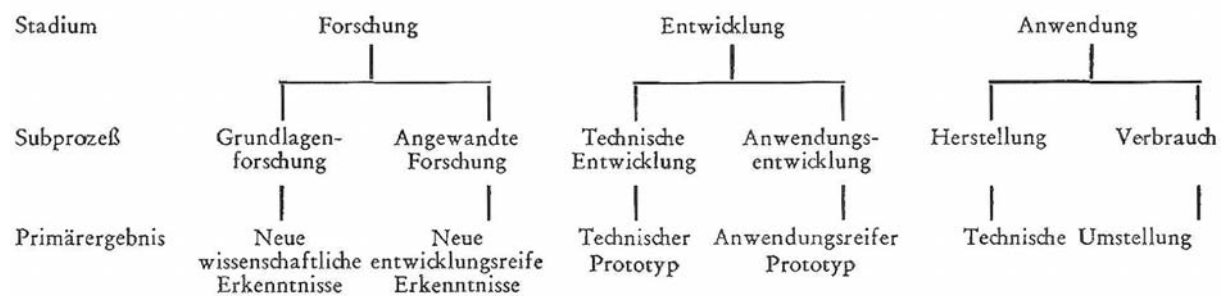


Abb. 62: Phasen des Innovationsprozesses [520]

¹²⁷ Einen guten Überblick über den Brückenbau in den USA in der zweiten Jahrhunderthälfte geben [156], [230], [222], [134], [137].

Für die Analyse wurden die in Deutschland, Großbritannien, Frankreich und den USA erteilten Patente in Tab. 1 zusammengestellt. Grundlage dafür bildete die Auswertung von

- DEPATISnet, der Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes, sowie
- ESPACenet, der Datenbank des Europäischen Patentamtes ¹²⁸.

Tab. 1: Zusammenstellung der Patente zur Auflagerung von Brücken

Jahr	erteilt in	Anmelder aus ¹	Thema	Gegenstand (in Stichpunkten)	Verweis
1878	D		Tragwerk	Ausgleich von Auflagersenkungen	K9 - 1
1878	D		Lager	Verdrehung des Lagers um seine Vertikalachse	K9 - 2
1878	D		Lager	Kombination verschiedener Bauelemente auch zum Ausgleich von Auflagersenkungen	K9 - 3
1881	D		Tragwerk	zusätzliche Pendelstütze im Kämpfergelenk	K9 - 4
1889	D		Tragwerk	Ausgleich von Auflagersenkungen	K9 - 5
1889	GB		Lager	Pendelstütze	K9 - 27
1892	USA	GB	Lager	Pendelstütze (wie K9 - 27)	K9 - 40
1895	GB		Lager	Vermeidung von kritischen Kontaktspannungen durch permanente Flächenauflagerung	K9 - 28
1896	D	GB	Lager	Vermeidung von kritischen Kontaktspannungen durch permanente Flächenauflagerung (wie K9 - 28)	K9 - 6
1897	USA	GB	Lager	Vermeidung von kritischen Kontaktspannungen durch permanente Flächenauflagerung (wie K9 - 28)	K9 - 41
1898	GB		Lager	Prinzipiell wie K9 - 28 – aber mit einer Art Kugelzapfen für allseitige Bewegungsfreiheit	K9 - 29
1898	GB		Patentschrift lag nicht vor		[611]
1899	GB		Patentschrift lag nicht vor		[613]
1900	D		Lager	kippsichere Stelzenlager	K9 - 7
1901	D		Tragwerk	Eintrag einer dem Eigengewicht und der Verkehrslast entgegengesetzt wirkenden äußeren Kraft	K9 - 8

¹²⁸ Beide Datenbanken ermöglichten den Zugriff auf Patente in den genannten Staaten. Gleichwohl war die lückenlose Recherche nicht uneingeschränkt möglich, da in beiden Institutionen die für diese Arbeit interessanten historischen Patente noch nicht vollständig digital verfügbar sind. Die DEPATIS-Datenbank führt zwar alle deutschen Patentschriften seit Einführung des Patentwesens im Deutschen Reich 1877, aber nicht alle ausländischen Patentschriften – jedoch „die meisten“ [654]. Die ESPACE-Datenbank gilt als die weltweit umfassendste und aktuellste Patentdatenbank [650] und führt laut [658] offenbar alle(!) Patente ab 1895. Ältere Patente hingegen sind noch nicht vollständig aufgenommen. Darüber hinaus ist das Europäische Patentamt für ESPACenet auf die Zuarbeit der patenterteilenden Behörden angewiesen und kann deshalb keine Vollständigkeit des Datenbestandes garantieren [650]. Die damit einhergehenden Unschärfen bezüglich der in Großbritannien, Frankreich und den USA erteilten Patente wären nur durch Zuhilfenahme professioneller Recherchertools oder -dienste bzw. durch Vor-Ort-Recherche in den Patentämtern zu reduzieren gewesen.

1903	GB		Lager	durch Flüssigkeit geschmierte/geschützte Wälzkörper	K9 - 30
1906	USA	KA	Lager	Lagesicherung der Wälzkörper	K9 - 42
1906	D		Lager	zugkraftübertragendes Lager	K9 - 9
1910	D		Lager	Waagebalken für gemeinsame Lagerung aneinanderstoßender Träger	K9 - 10
1911	GB	D	Lager	gemeinsame Lagerung aneinanderstoßender Träger (wie K9 - 10)	K9 - 31
1912	GB		Lager	für Auflagerung von Nebenträgern	K9 - 32
1916	GB	FR	Tragwerk	Verbindung auskragender, eingespannter Bauwerksteile zur Entlastung des Baugrunds	K9 - 33
1920	USA		Lager	Kugelpapfen-Kipplager als Gelenke für Beton-Bogenbrücken	K9 - 43
1920	FR		Lager	durch Federn gebildetes elastisches Auflager	K9 - 35
1920	USA		Lager	lastverteilende sowie ausgeformte Gelenke für Betonbrücken	K9 - 44
1922	USA		Lager	eingehaustes Einrollenlager auf gekrümmten Wälzflächen	K9 - 45
1923	D		Reparat: Unterbau	Auflagervorrichtung für die Auswechslung schadhaften Mauerwerks	K9 - 11
1925	D		Lager Tragwerk	kontinuierlich nachstellbares Keillager zur Höhenregulierung von Bauwerken	K9 - 12
1925	USA	GB	Lager	Lagesicherung und Inspektion des Wälzkörpersatzes	K9 - 46
1927	D		Lager	gepanzertes Wälzgelenk für Betonbrücken	K9 - 13
1930	GB	Ö	Lager	eingehauste, aber zu Wartungszwecken zugängliche Wälzlager für Stahlbetonkonstruktionen	K9 - 34
1930	USA		Lager	Rollenlager	K9 - 47
1931	D		Lager	zweiseitig bewegliches Einrollenlager	K9 - 14
1932	D		Lager	für geneigte Wälzflächen mit seilgeführten Wälzkörpern	K9 - 15
1932	D		Lager	zur Bestimmung der Drucklinie für nur temporär eingebaute und austauschbare Gelenke für Betonbrücke	K9 - 16
1936	D		Lager	gepanzertes Rollenlager	K9 - 17
1937	D		Lager	Drehgelenk zur verzögerten Reaktion auf plötzliche Belastung	K9 - 18
1937	D		Lager	Vielkugellager	K9 - 19
1940	D		Lager	Vielrollenlager	K9 - 19
1941	D		Lager	hochfeste Lager	K9 - 20
1942	USA		Lager	hebelgelenkartige Verbindung der Untergurte von Durchlaufträgern untereinander sowie mit dem Unterbau	K9 - 48
1942	D		Lager	allseitig bewegliches Lager	K9 - 21
1943	FR	D	Lager	hochfeste Lager	K9 - 36
1946	D		Lager	Führung für pendelnde Wälzkörper	K9 - 22
1947	FR		Lager	Gelenkwirkung durch Granulat- oder Sandeinlage (ähnlich Sandtopf)	K9 - 37
1948	D		Lager	geführte Pendelstütze	K9 - 23
1949	D		Lager	elektrisch isoliertes Lager	K9 - 24
1950	D		Lager	Wälzgelenk aus Beton	K9 - 25
1950	FR	D	Lager	Lagerkörper aus Stahlbeton	K9 - 38

¹⁾ nur angegeben, wenn abweichend von Spalte „erteilt in“

Legende für Abkürzungen: D – Deutschland, GB – Großbritannien, FR – Frankreich, Ö – Österreich, KA – Kanada,

Tab. 1 veranschaulicht die rege Patentaktivität im Deutschen Reich praktisch seit Etablierung des Patentwesens im Jahre 1877 und stützt die in den vorangegangenen Abschnitten veranschaulichte Dominanz Deutschlands bei der Lagerentwicklung. Die Zahl der Patentanmeldungen ließ um 1900 zunächst nach, deutet jedoch ab Mitte der 1920er-Jahre auf wiedererstarkte Forschungsaktivitäten in Deutschland hin. Wegen der in Fußnote 128 auf Seite 68 genannten Unschärfen eignet sich die Zusammenstellung in Tab. 1 nur eingeschränkt, um die mangelnde Forschungstätigkeit in Großbritannien, Frankreich und den USA im Lagerbereich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu belegen. Es zeichnet sich jedoch ab, dass nennenswerte eigene Patentaktivitäten in Großbritannien erst zur Jahrhundertwende sich zeigten. Verglichen mit Deutschland fanden eigene Patentanmeldungen zu Brückenlagern in den USA – und noch weniger in Frankreich – kaum statt.

Neben dieser quantitativen Einschätzung sind einige qualitative Aspekte der angemeldeten Patente relevant, wobei grundsätzlich gilt, dass nur vereinzelt Ideen auch beachtenswerte praktische Anwendungen fanden.

So spiegelten sich interessanterweise die bereits im Abschnitt 5.1.3 erläuterten Bemühungen in Deutschland zur Optimierung des Systems „Brücke“ auch in den Patentanmeldungen wider. Das Gros der bis zur Jahrhundertwende in Deutschland geschützten Ideen thematisierte nicht allein das Lager, sondern zielte auf das Tragwerk des Überbaus, wobei der Umgang mit Auflagersenkungen bei Durchlaufträgern besonderes Augenmerk fand (Abb. 63).

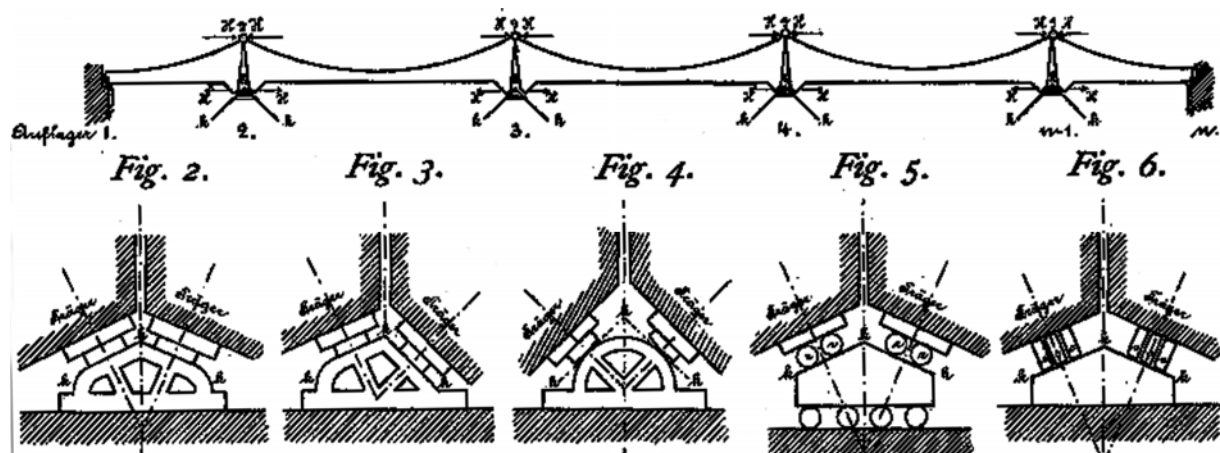


Abb. 63: Aus Patentschrift von OFFERMANN „Keilförmige Auflager für kontinuierliche Gelenkträger“ von 1889 [585]

Die von Großbritannien Ende des 19. Jahrhunderts ausgehenden Patentbestrebungen wurden ganz wesentlich von ALFRED WESTWOOD¹²⁹ bestimmt, der sein dort 1895 angemeldetes Patent mit flächigem Lasttransfer zur Vermeidung kritischer Kontaktspannungen direkt auf Deutschland (K9 - 6) und auf die USA (K9 - 41) ausweitete. Allerdings war WESTWOODS Idee seiner Zeit voraus. Die den Gleitflächen zugemutete hohe Reibung stand einer Anwendung noch entgegen. Erst die Einführung reibungsarmer Zwischenschichten erlaubte die erfolgreiche Verwirklichung des von ihm vorgeschlagenen Prinzips zweier sich relativ gegeneinander verschiebenden Gleitebenen. Sein noch einachsrig gedachtes Lager stand unmittelbar Pate für das von WALTER G. WATTS¹²⁹ 1899 in Großbritannien patentierte allseitig bewegliche Lager (K9 - 29). Auffällig ist auch die Ähnlichkeit mit dem 1965 in Großbritannien vorgeschlagenen „bi-convex arrangement“ mit Gummieinlagen (Abb. 64). Im Prinzip gehen auch das nach dem Zweiten Weltkrieg in Großbritannien genutzte „Anticlastic“-Lager¹³⁰ sowie das bereits eingeführte Kalottengleitlager auf WESTWOODS Ansatz zurück (Abb. 65).

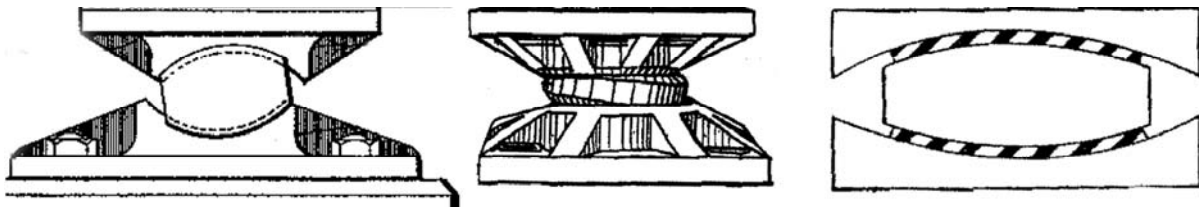


Abb. 64: Prinzip sich gegeneinander verschiebender Gleitflächen; Links: Patent WESTWOODS [610], Mitte: Patent WATTS [612], Rechts: Bi-Konvex-Lager mit Zwischenschichten aus Gummi [18]

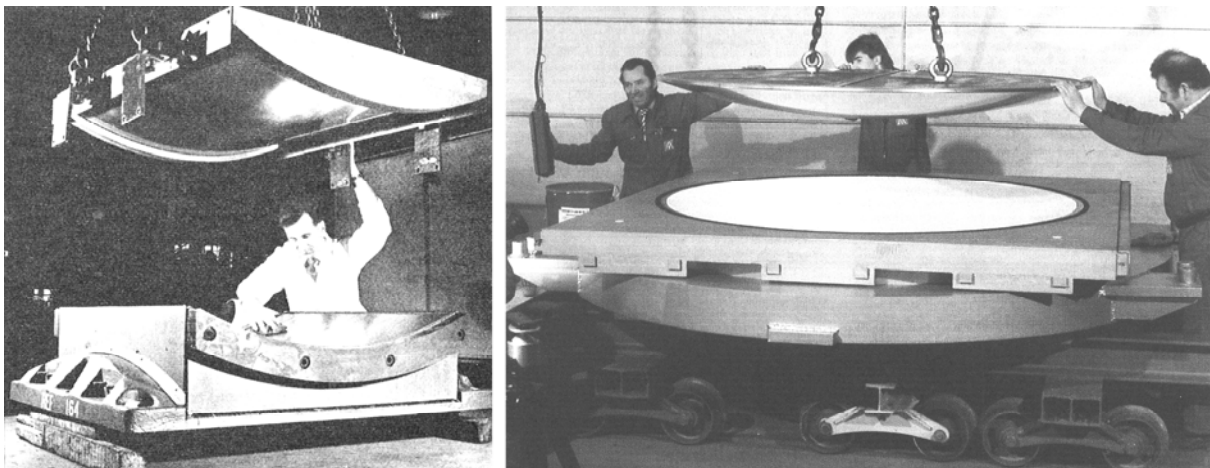


Abb. 65: Links: Anticlastic-Brückenlager mit 2740 t Tragfähigkeit während der Montage (um 1968) [115], Rechts: Kalottengleitlager Typ KGe 114 300 kN, um 1989 eines der größten gebauten Lager dieser Art [53]

¹²⁹ Im Zusammenhang mit erteilten Patenten wurden keine Lebensdaten recherchiert.

¹³⁰ Anticlastic-Lager bestehen aus zwei orthogonal zueinander gekrümmten Gleitebenen.

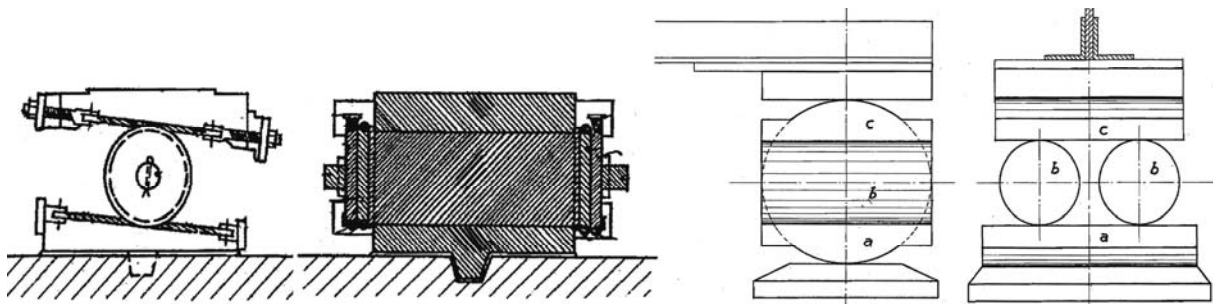


Abb. 66: Links: Seilgeführte Lager [595], Rechts: Längs- und querbewegliches Walzenlager [594]

Auf diejenigen Patente, die nach 1900 Bedeutung für die Praxis erlangten, ist vor allem im Abschnitt 4.3.3 eingegangen worden. Es sollen hier noch die seilgeführten Lager erwähnt werden (K9 - 15) – ein Prinzip, das die Firma Kreuz später zur Verhinderung des Schräglaukens von Einrollenlagern verwendete [36/S.34]. Darüber hinaus ließ sich 1931 die Aktiengesellschaft für Eisenindustrie und Brückenbau ein Lager patentieren, welches die Funktionen „einachsiges Kippen“ und „zweiachsige Verschieblichkeit“ bei geringster Bauhöhe des Lagers vereinte (Abb. 66).

Erwartungsgemäß kam es auch bei den Patenten von Brückenlagern zu Auseinandersetzungen mit Bezug auf etwaige Prioritätsansprüche. Als zum Beispiel 1910 der Ingenieur LEOPOLD HERZKA¹²⁹ in der Zeitschrift *Der Eisenbau* ein „Kippsicheres Stelzenlager“ vorstellte und „zur freien Benutzung“ überließ, stellte ihm BERNHARD sein 1900 patentrechtlich geschütztes „Stand sicheres Trägerauflager“ entgegen. BERNHARD hatte das Patent zwar inzwischen verfallen lassen, legte jedoch Wert auf die Klarstellung der Prioritätsrechte (Abb. 67).



Abb. 67: Kippsichere Lager; Links: Vorschlag von HERZKA [49], Mitte/Rechts: Aus dem Patent BERNHARDS [587]

5.1.6 Wertung und Zusammenfassung

Das 19. Jahrhundert war in vielerlei Hinsicht ein Jahrhundert tief greifender Veränderungen. Weitreichende Wirtschafts- und Bildungsreformen sowie die bürgerliche Revolution schufen die Grundlagen für die rasche Entwicklung Deutschlands von einem rückständigen Agrarland zu einer führenden Industrienation. Baustatische Methoden im heutigen Verständnis begannen die bis dahin weitgehend empirischen Entwurfsansätze abzulösen. Die deutsche Brückenbaukunst erhob sich über ihr vormals unbedeutendes Niveau und setzte insbesondere

zu statisch-konstruktiven Kriterien neue Maßstäbe. Die Erfolge im Bauwesen – vor allem im Eisenbahnbau – und in anderen Tätigkeitsfeldern der Ingenieure gingen einher mit Professionalisierungsbestrebungen des sich formierenden Berufsstandes der Ingenieure, deren wachsendem Selbstbewusstsein sowie ihrem Wunsch nach gesellschaftlicher Anerkennung. Diese Bemühungen gipfelten im Promotionsrecht für Technische Hochschulen und deren Gleichstellung mit den Universitäten um 1900.

Die Fortschritte und Erfolge der deutschen Brückenbauer bei der Verwissenschaftlichung des Tragwerksentwurfs sowie bei der Durchdringung konstruktiver Einzelheiten sind ganz wesentlich auf den zunehmenden Einfluss theoretisch geschulter Ingenieure zurückzuführen. Jene forderten eine weitgehende Anpassung des Tragwerks an die statische Berechnung und forcierten damit in Deutschland unter anderem die Entwicklung einer Lagertechnik, die bei Bedarf alle erdenklichen Freiheitsgrade des Überbaus ermöglichen konnte. Neben der Translation und der Rotation des Tragwerks – zunächst in Brückenlängs-, später auch in Brückenquerrichtung – wurden schon in den 1870er-Jahren Lager diskutiert, die eine Verdrehung derselben um ihre Vertikalachse zuließen (K9 - 2). Dass ein wissenschaftlich begründeter Berechnungsansatz für die analytisch schwer zu fassenden Kontaktspannungen in Deutschland entwickelt wurde, unterstreicht ein weiteres Mal Deutschlands führende Rolle bei der Lagerentwicklung.

Die Auswertung der zu Brückenlagern im Untersuchungszeitraum erteilten Patente bestätigte diese Bedeutung. Hierbei wurde besonders deutlich, dass der Führungsanspruch Deutschlands sich nicht allein auf die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts – aus genealogischer Sicht die Entwicklungsjahre der gusseisernen und stählernen Brückenlager – beschränkte, sondern diese führende Position über die Zwischenkriegsjahre hinweg bis zum Ende des Untersuchungszeitraums sich weiterverfolgen ließ. Denn auch bei der Umsetzung des Konstruktionsprinzips der gusseisernen und stählernen Lager mit vermeintlich besserem oder preiswerterem Material sollten die entscheidenden Impulse aus Deutschland kommen.

5.2 Typologische Erfassung

Das Studium der historischen wie auch der aktuellen Literatur offenbarte schnell Unzulänglichkeiten beim Gebrauch der Bezeichnungen für die Vielzahl unterschiedlicher Lagerarten, die insgesamt zur Gruppe der gusseisernen und stählernen Lagergeneration gehören. Die zügige Entwicklung dieser Generation in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ließ offenbar keine Zeit für eine Klärung der Begriffe, und aus dem Bedeutungsverlust dieser Lager nach dem Zweiten Weltkrieg ergab sich schließlich keine Notwendigkeit mehr, die „Versäumnisse“ der Entwicklungsphase konsistent nachzuholen. Tab. 2 erläutert exemplarisch,

wie der z.B. an der 1868 eröffneten Lekbrücke verwendete Brückenlagertyp im Lauf der Jahrzehnte in der Fachliteratur bezeichnet worden ist und verdeutlicht gleichzeitig, wie Begrifflichkeiten offenbar bis heute von der Perspektive der jeweiligen Verfasser abhängig geblieben sind.



Abb. 68: Lekbrücke bei Kuilenburg in den Niederlanden, zur ihrer Zeit die weitestgespannte Balkenbrücke der Welt bei vermutlich erstmaliger Anwendung von Bessemer-Flussstahl durch die Fa. Harkort [202]; Links: Ansicht [560], Rechts: Bewegliches Lager [175]

Tab. 2: Exemplarische Bezeichnung eines wie in Abb. 68 dargestellten Lagers

Jahr	Name	Bezeichnung als ...	Quellen
1875	Winkler	Zapfen-Kipplager	[108/S.291]
1882	Steiner	Zapfen-Kipplager	[236/S.501]
1889	Tetmajer	Bolzen-Kipplager	[349/S.149]
1898	Rieppel	Bolzen-Kipplager	[228/S.566]
1900	Mehrtens	Bolzen-Kipplager	[204/S.87]
1905	Vianello	Bolzen-Kipplager	[259/S.477]
1908	Häseler	Zapfen-Kipplager	[161/S.99]
1908	Schaper	Zylinderzapfen-Kipplager	[237/S.344]
1911	Bernhard	Zylinderzapfen-Kipplager	[126/S.344]
1914	Kollmar	Bolzen-Kipplager	[57/S.2]
1932	Schau	Zylinderzapfen-Kipplager	[245/S.170]
1984	DIN 4141	Linien-Kipplager ¹⁾	[373/T.1,S.3]
2003	Lorenz	Linien-Kipplager über Bolzen	[66/S.60]

¹⁾ Den Erläuterungen zu Abschnitt 2 „Begriffe“ auf Seite 7 der DIN zufolge werden die historischen Linien-Kipplager (Tangentallager) und Zapfen-Kipplager offenbar unter dem Begriff „Linien-Kipplager“ zusammengefasst.

5.2.1 Existierende Ansätze

Die wenigen dem Verfasser bekannten Ansätze zur typologischen Erfassung der historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager fußen im Prinzip auf der von WINKLER schon 1875 im ersten Fachbuch zur Brückenlagertechnik vorgeschlagenen Gliederung (Abb. 69). Als Hauptkriterium der Einteilung unterschied WINKLER die Brückenlager bezüglich der durch sie ermöglichten Relativbewegungen des Überbaus. Mit Bezug auf das Translations-

vermögen differenzierte er in Feste Lager, Gleitlager und Rollenlager; darüber hinaus unterteilte er die Brückenlager bezüglich der Rotationsfähigkeit des Überbaus in Flächenlager und Kipplager¹³¹ [108/S.245]. Letztere gliederte er bereits in Zapfen- und Tangential-Kipplager, je nach Ausführung der Berührungsfläche. Damit war der begriffliche Rahmen prinzipiell geschaffen, in dem sich die Fachwelt bis ins 20. Jahrhundert hinein orientieren konnte.

		ROTATION		
		Fest (Flächenlager)	Beweglich (Kipplager)	
			Tangential	Zapfen
TRANSLATION	Fest			
	Gleiten			
	Beweglich Rollen			

Abb. 69: Schematische Gliederung der Brückenlager abgeleitet aus WINKLERS Vorschlag 1875 in [108]

Doch die vor allem im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts zunehmende Vielfalt an unterschiedlichen Lagertypen führte zu einem uneindeutigen Gebrauch der Bezeichnungen. Insbesondere die Einrollenlager und die verwandten Pendellager, letztere schon um 1880 für den amerikanischen Brückenbau dokumentiert [236/Taf.XXII], passten nicht mehr ohne weiteres in WINKLERS Schema. Im Gegensatz zu der bis dahin üblichen funktionalen Trennung von Translation und Rotation innerhalb der Lager war die Verknüpfung beider Funktionen den Einrollen- und Pendellagern inhärent und ein festes Auflager also ausgeschlossen.

¹³¹ WINKLER führte die Bezeichnung „Kipplager“ ein. Er wies darauf hin, dass er diese Bezeichnung gewählt habe, da ihm andere Bezeichnungen nicht bekannt seien [108/S.290].

Eine schlüssige und weitgehend vollständige typologische Erfassung der Gesamtheit der gusseisernen und stählernen Brückenlager ist dem Verfasser nicht bekannt. Weder fand sie sich in den Fachbüchern zum Bau eiserner Brücken, die im frühen 20. Jahrhundert erschienen – hier allen voran SCHAPERS in mehreren Bänden publiziertes Lehr- und Nachschlagewerk *Eiserne Brücken*¹³² – noch in der von KOLLMAR vor dem Ersten Weltkrieg verfassten Monographie *Auflager und Gelenke*¹³³. Das 1974 in der Erstauflage, 1995 in der 2. Auflage und 2002 in englischer Übersetzung veröffentlichte Buch *Lager im Bauwesen*¹³⁴ thematisierte vornehmlich die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte Brückenlagertechnik. Die nunmehr historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager fanden nur noch beiläufig Erwähnung. Gleiches gilt für die relevanten Normenwerke, die *DIN 4141* sowie *DIN EN 1337*.

5.2.2 Typologie

Ein Ziel dieser Arbeit bestand in der Erarbeitung einer schlüssigen typologischen Klassifikation, welche die Gesamtheit der zu dieser Generation gehörigen Brückenlager konsistent erfasst. Die Herausforderung bestand dabei hauptsächlich darin,

- ein geeignetes Gliederungsschema zu entwickeln, welches
 - die Ein- und Zuordnung möglichst der Gesamtheit der unter „historische gusseiserne und stählerne Brückenlager“ subsumierten Typen erlaubt,
 - konstruktive Eigenheiten berücksichtigt, die als wesentliche Charakteristika der Lager Eingang in die typologische Ordnung finden müssen sowie
- eine begriffliche Schnittmenge zu finden zwischen
 - der historischen Terminologie, die in groben Zügen noch heute gebräuchlich ist und
 - einer evtl. heute üblichen Bezeichnung, die unter Umständen jüngere Entwicklungen einbezieht.

Für eine solche Typologie erschien es sinnvoll, die von WINKLER vorgegebene Gliederung nach Kriterien der Beweglichkeit aufzugreifen und weiterzuentwickeln. Die gewählten Gliederungsebenen ergaben sich für Translation und Rotation entsprechend der nachfolgenden Tabellen und Erläuterungen:

¹³² Siehe in [237] bis [243].

¹³³ Siehe in [57].

¹³⁴ Siehe [28], [32], [35].

- Translation

Tab. 3: Gliederungsebenen und -kriterien für die Translation

Ebene	Gliederungskriterien			
1	Translation			
2	fest	beweglich		
3		Translationsvorrichtung losgelöst von Rotationsvorrichtung	Translationsvorrichtung verknüpft mit Rotationsvorrichtung	
4		Gleiten	Wälzen	Gleiten
5			Kugel, Stelze Rolle	Pendel, Kugel Stelze, Rolle

Hier nahm Gliederungsebene 3 Bezug auf die bereits angedeutete konstruktive Eigenheit der Einrollen- und Pendellager, eine Kategorie „festes Lager“ nicht zuzulassen. Dieses Spezifikum verlangte im Sinne einer typologischen Zuordnung zwingend eine separate Erfassung. Bei den unter „Translationsvorrichtung losgelöst von Rotationsvorrichtung“ erfassten Typen waren „feste“ Lager in jedem Fall möglich. Hier stellten separate konstruktive Details sowohl das Kippen (Rotation) als auch die Verschiebung (Translation) sicher (z.B. Abb. 13 auf Seite 21). Bei den der Kategorie „Translationsvorrichtung verknüpft mit Rotationsvorrichtung“ zugeordneten Lagertypen hingegen bildeten Translations- und Rotationsvorrichtung eine Einheit – wie zum Beispiel bei den Einrollen- und Pendellagern, aber auch bei den Berührungskipp-Gleitlagern (Abb. 70). Wenngleich bei den Pendellagern (wie z.B. in Abb. 70) mit Zapfen und Pendel zwei anscheinend separate Konstruktionselemente eine funktionale Trennung von Rotations- und Translationsvorrichtung andeuten, so bedingen sich diese nur anscheinend entkoppelten Elemente doch gegenseitig, denn nur ein funktionierender Zapfen für die Rotation ermöglicht auch eine Translation und umgekehrt. Bei den „klassischen“ Kipp-lagern hingegen, wie sie unter „Translationsvorrichtung losgelöst...“ zusammengefasst wurden, gab es diese Abhängigkeit nicht. Fiel hier die Rotationsvorrichtung aus, funktionierte immer noch die Translation und umgekehrt. Diese Voraussetzung erst ermöglichte die hinsichtlich der Translation „festen“ Lager, ohne gleichzeitig auf das „Kippen“ verzichten zu müssen.



Abb. 70: Beispiele für Lager mit verknüpfter Translations- und Rotationsvorrichtung; Links: Zylinderzapfen-Pendellager der Wasserturmbrücke Berlin-Ostkreuz, Mitte: Einrollenlager der Erfthbrücke in Neuss/Rhein, Rechts: Linienkipp-Gleitlager der Hochbahnlinie U2 Berlin nach dem Ausbau und Reinigung; An der gewölbten Kippplatte sind deutlich die Spuren des Gleitens zu erkennen. Die Art der Befestigung des Lagers am Tragwerk veranschaulichen sowohl die Bohrungen als auch der verbliebene Senkniet; [670]

- Rotation

Tab. 4: Gliederungsebenen und -kriterien für die Rotation

Ebene	Gliederungskriterien									
1	Rotation									
2	konstruktiv nicht vorgesehen (Flächenlager)					konstruktiv vorgesehen (Kipplager)				
3	einfach	justierbar		gedefert		Bolzen	Berührung		Zapfen	
4		Schraube	Keil	Holz	Stahl		Linie	Punkt	Halb-	Voll-
5									Kugel	Kugel
									Zylinder	Zylinder

In der Gliederungsebene 2 wurde die heute gebräuchliche Unterteilung von Lagern in „fest“ und „beweglich“ aufgegeben, um Missverständnissen bei der Unterscheidung von Flächenlagern und Kipplagern vorzubeugen. Gegenüber Kipplagern wiesen Flächenlager zwar kein explizites Kippelement auf, ihr Verhalten im Einbauzustand konnte jedoch nicht als „fest“ im Sinne von „eingespannt“ bezeichnet werden. Bei flächigen Rollenlagern, wie zum Beispiel in Abb. 71, „kippte“ der Überbau bei Durchbiegungen unter Belastung über die der Öffnung zugewandten Rolle. Um dieses Verhalten innerhalb der Typologie zu verdeutlichen, wurden für die Ebene 2 die Bezeichnungen „konstruktiv nicht vorgesehen“ und „konstruktiv vorgesehen“ gewählt.



Abb. 71: Gegenüberstellung des Kippverhaltens; Links: Flächenlager, Rechts: Kipplager

Die Gliederungsebene 3 berücksichtigt bei den Flächenlagern neben der in Abb. 71 veranschaulichten „einfachen“ Ausführung auch die typologische Erfassung der „justierbar“ und „gedefert“ ausgebildeten Flächenlager. Erstere sollten eine exakte Höhenregulierung der Lager beim Einbau sicherstellen [108/S.303], letztere die beim Befahren der Brücke auftretenden Stöße dämpfen [108/S.264].

Aufseiten der Kipplager sieht Ebene 3 eine Differenzierung vor, um der unterschiedlichen konstruktiven Realisierung des Kippens zu entsprechen. Abb. 72 veranschaulicht dazu die Eigenheiten von

- Bolzen-Kipplager – auf Abscheren beanspruchter Kippunkt,
- Berührungs-Kipplager – durch Wälzreibung beanspruchter Kippunkt und
- Zapfen-Kipplager – durch Gleitreibung beanspruchter Kippunkt

zur Realisierung der kippenden Bewegung. Die Ebenen 4 und 5 beschreiben im Wesentlichen die Details zur technischen Umsetzung und benötigen hier keiner weiteren Erläuterung.

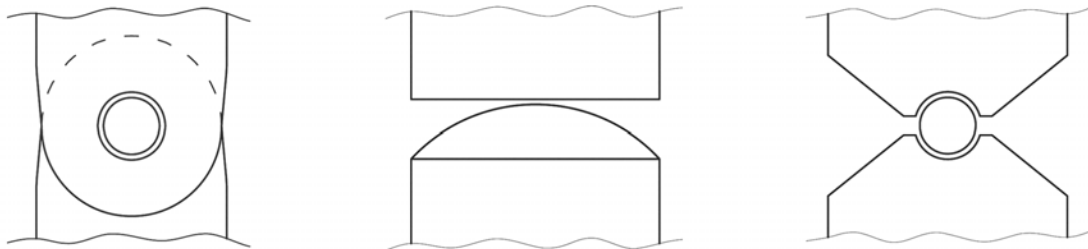


Abb. 72: Realisierung des Kippens, Links: Bolzen-Kipplager, Mitte: Berührungs-Kipplager (auch: Tangential-Kipplager), Rechts: Zapfen-Kipplager

• Eingrenzung

Sollte einerseits das zu erarbeitende Gliederungsschema die gusseisernen und stählernen Brückenlager möglichst vollständig erfassen, so galt es andererseits aus Gründen der Übersichtlichkeit, die Lagervielfalt auf ein für ein Gliederungsschema sinnvolles Maß einzugrenzen. Zum Beispiel war es

- wichtig, dass es bewegliche Lager – zum Beispiel Rollenlager – gab, aber unwichtig, dass es doppelreihige Rollenlager oder schräg gestellte Rollenlager gab,
- wichtig, dass es Stelzenlager gab, jedoch unwichtig, dass es auch kippsichere Stelzenlager gab und
- wichtig, dass bei den Zapfenkipplagern zwischen Zylinder- und Kugelpapfen und bei den Berührungkipplagern zwischen Linien- und Punktberührung unterschieden wurde, aber unwichtig, Fehlentwicklungen zu benennen, die – obgleich angewendet – jedoch weder als Brückenlager sich eigneten noch als solche sich etablieren konnten.

- Bezeichnungen

Die Vielfalt aller unter „historische gusseiserne und stählerne Brückenlager“ zusammengefassten Arten erlaubte ein ebenso vielfältiges Spektrum von Bezeichnungen. Das erarbeitete Gliederungsschema verdeutlicht hierbei exemplarisch, dass die eindeutige Benennung einer jeden Lagerart zwar möglich ist, wegen der Vielschichtigkeit den üblichen und praktisch auch brauchbaren Rahmen jedoch oft übersteigt. Folgerichtig hat sich bei der Bezeichnung der Brückenlager durchgesetzt, diese gleich einer „Familie“ zuzuordnen – je nachdem, worauf bei der Benennung Wert gelegt wird. Soll die Längsbeweglichkeit betont werden, spricht man von Gleit-, Wälz-, Rollen- oder Stelzenlagern, ohne dabei auf die Rotationsfähigkeit einzugehen. Liegt der Akzent hingegen auf dem Kippvermögen, spricht man von Zapfen-, Berührungs- oder Tangentiallagern oder schlichtweg nur von Kipplagern.

Die im Ergebnis der Bearbeitung entstandene Typologie fasst die Lager der gusseisernen und stählernen Brückenlagergeneration zusammen – siehe Übersicht 2 „Typologie der gusseisernen und stählernen Brückenlager“ in der Anlage zu dieser Arbeit. Die Prinzipskizzen sollen dabei die Wirkungsweise veranschaulichen, wobei die Bauteile schematisch dargestellt werden.

5.2.3 Wertung und Zusammenfassung

Mit der im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Typologie sind die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager erstmals vollständig erfasst und geordnet worden. Mit der Beweglichkeit als Gliederungsansatz wurde das ausschlaggebende Kriterium für die Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlager aufgegriffen, gab doch das Streben nach Beweglichkeit erst den Anstoß für die Entwicklung dieser Lagergeneration. Ein durch Rotation und Translation aufgespanntes Feld musste zwangsläufig – im Sinne einer Abstammungslehre – jede Entwicklungslinie mit den dazugehörigen „Unterarten“ erfassen.

Die eindeutige Benennung aller Lager in der Anlage „Typologie“ hat aus Sicht des Verfassers bestenfalls akademischen Wert, da sie oft zu Bezeichnungen führt, die auf Grund ihrer Länge ohne praktische Bedeutung bleiben dürften. Auch in Zukunft wird sich wohl die praxisübliche Benennung der Lager auf die angestrebte Kernaussage reduzieren. Ungeachtet dessen ermöglicht jedoch die vorliegende Typologie erstmals eine schlüssige konstruktive und begriffliche Einordnung eines jeden Lagers.

5.3 Bauaufsichtliche Verankerung

In den Zeiten ihrer primären Anwendung findet sich die bauaufsichtliche Verankerung der historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager vornehmlich in den Regelwerken zum Bau eiserner Brücken, deren Grundsätze innerhalb des Untersuchungszeitraums durch den Eisenbahnbau bestimmt wurden. Erst in der Zwischenkriegszeit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erschienen vermehrt Regelwerke zum Bau von Straßenbrücken, die sich jedoch inhaltlich stark an die existierenden Regelwerke für Bahnbrücken anlehnten. Bezugnehmend auf diese Entwicklung wird das nachfolgende Kapitel vorerst durch die Analyse von Vorschriften der Bahn bestimmt. Nach einem Ausblick auf die Regelwerke der Straßenbrücken und der weiteren Entwicklung im Anschluss an den Untersuchungszeitraum werden jene Normen und Vorschriften thematisiert, die explizit zur Lagertechnik erschienen.

5.3.1 Vorbemerkungen

An dieser Stelle sollen die Schwierigkeiten bei der Recherche nach historischen Regelwerken genannt werden, da es auch in Deutschland noch immer an einer umfassenden Inventarisierung historischer Normen zum Bauwesen allgemein bzw. zum Brückenbau im speziellen mangelt. Die Probleme bei der Bearbeitung lassen sich wie folgt benennen:

- Hauptproblem: Welche Normen oder Vorschriften gab es überhaupt?
- Folgeproblem: Wo können evtl. vorhandene Normen/Vorschriften eingesehen werden?

Diesbezüglich waren weder Online-Recherche noch diverse Bibliotheks-Datenbanken besonders hilfreich. Einen ersten Erfolg versprechenden Einstieg in die Nachforschungen verschaffte Prof. Dr.-Ing. HANS-CHRISTOPH THIEL vom Lehrstuhl Eisenbahn- und Straßenwesen der BTU Cottbus durch Vermittlung geeigneter Ansprechpartner bei der Deutschen Bahn AG, so dass sich insgesamt eine weitgehend vollständige Zusammenstellung der Reichs- und Bundesbahnvorschriften ermitteln ließ¹³⁵. Völlige Unklarheit bestand allerdings weiterhin zu Normen und Vorschriften der alten Staatseisenbahnen aus der Zeit vor 1920.

Hierzu nahm der Verfasser Kontakt zu einschlägigen Firmen auf, die aus ehemaligen Brückenbauanstalten hervorgegangen oder in sonstiger Konstellation mit solchen inzwischen eine Einheit eingegangen sind. Insbesondere das Historische Archiv der MAN-Aktiengesellschaft in Augsburg, so ließen Nachfragen vermuten, berge noch einen gut sortierten

¹³⁵ Besonderer Dank gilt diesbezüglich Herrn E. GENTZ von der Deutschen Bahn AG – siehe [646].

Bestand an historischen Vorschriften¹³⁶. Im Sommer 2006 besuchte der Verfasser das Archiv in Augsburg und zusätzlich jene der Maschinenfabrik Esslingen¹³⁷ und des Deutschen Museums in München. Der in dieser Reise zusammengestellte Fundus umfasste wichtige, im süddeutschen Raum erschienene Vorschriften der alten Staatseisenbahnen, einige der Preußischen Staatseisenbahn sowie vereinzelte aus der frühen Zeit der Reichsbahn. Die Regelwerke der Preußischen Staatseisenbahn konnten durch Auswertung der seit 1881 erschienenen Zeitschrift *Centralblatt der Bauverwaltung* vervollständigt werden. Diese Quellensammlung bildete die hauptsächliche Grundlage für die Auswertung der historischen Normen und Vorschriften in dieser Arbeit. Sie wurde ergänzt durch Besuche im Landesarchiv, im Ernst & Sohn-Archiv, in der Zweigstelle des DB-Archivs – jeweils in Berlin – sowie durch eine ausführliche Sichtung der Reste des Archivs der früheren Reichsbahndirektion Cottbus¹³⁸.

Eine chronologisch sortierte Zusammenstellung der ausgewerteten Quellen findet sich im entsprechenden Teil im Literaturverzeichnis ab Seite 204.

5.3.2 Anfänge

Bereits 1848 gab es Anregungen, einheitliche Vereinbarungen zum Abgleich der Konstruktionen von Bahn und Betriebsmittel aufzustellen¹³⁹, „[...] um die Transportmittel von einer Bahn auf die andere ungehindert übergehen zu lassen“ [465/S.444]. Das vermutlich erste, speziell auf den Eisenbau bezogene Regelwerk erschien 1862 in Bayern als *Vorschriften über den Entwurf, die Ausführung und Prüfung schmiedeeiserner Straßenbrücken*, denen bereits 1878 in Form der *Vorschriften über Entwurf, Ausführung und Prüfung von Straßenbrücken mit eisernem Überbau betr.* [K7- 2] eine Überarbeitung folgt. Hier werden Brückenlager jedoch nicht erwähnt¹⁴⁰.

¹³⁶ Die Firmenhistorie führt über die Brückenbauanstalt Gustavsburg zurück bis zur 1837 gegründeten Nürnberger Stammfabrik Klett & Co. Der besondere Dank des Verfassers gilt hier Frau GABRIELE MIERZWA vom Historischen Archiv für ihre Unterstützung bei der Recherche.

¹³⁷ Inzwischen in der Daimler AG aufgegangen, Sitz Stuttgart.

¹³⁸ Die Reichsbahndirektion (RBD) Cottbus wurde um 1991 aufgelöst und der RBD Berlin zugeordnet. Mit der Auflösung der RBD Cottbus verschwand ein Teil des Archivs, ein anderer Teil wurde vernichtet. Teile lagern in Dresden, Berlin und Potsdam. Der vom Verfasser gesichtete Teil des Archivs befindet sich am Lehrstuhl Eisenbahn- und Straßenwesen der BTU Cottbus; [655].

¹³⁹ Seit 1866 werden diese als *Technische Vereinbarungen des Vereins Deutscher Eisenbahnverwaltungen ueber den Bau und die Betriebseinrichtungen der Eisenbahn* vom Verein deutscher Eisenbahnverwaltungen herausgegeben. Neben umfangreichen Regelungen zu Lichtraumprofil, Spurweite, etc. gab es darin ebenfalls eine kurze Anmerkung zur Konstruktion eiserner Brücken, jedoch erwartungsgemäß keine Ausführungen zu den Brückenlagern (vgl. K7- 1).

¹⁴⁰ Seltsamerweise bezogen sich diese ganz frühen Regelwerke auf Straßenbrücken und nicht auf Brücken der Bahn. Sie bildeten nach Kenntnis des Verfassers jedoch die Ausnahme.

1886 erschienen - herausgegeben vom Verband deutscher Architekten- und Ingenieurvereine und dem Verein deutscher Eisenhüttenleute - die *Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau*¹⁴¹. Die *Normalbedingungen* regelten die Qualität der Materialien, die Herstellung der Eisenkonstruktion sowie die Abnahme nach Vollendung der Bauarbeiten. Die konkreten Angaben bezüglich der Brückenlager gingen darin nicht über die Anforderung hinaus, dass durch geeignete Zwischenlagen aus Zement oder Blei eine gleichmäßige Weiterleitung des Auflagerdrucks aus dem Brückenlager in die Auflagerbank zu gewährleisten sei (vgl. K7- 4).

Vor allem in dem Bestreben, die bis zum letzten Drittel des 19. Jahrhunderts verbreitete Vielfalt von Materialien zu vereinheitlichen bzw. für diese Mindeststandards zu vereinbaren, erschienen praktisch gleichzeitig mit den *Normalbedingungen* die *Vorschriften für Lieferungen von Eisen und Stahl*. Diese, 1889 vom Verein deutscher Eisenhüttenleute aufgestellt, regelten unter anderem Beschaffenheit, Materialprüfung, Toleranz sowie die Abnahme von Eisen und Stahl. Konkrete Aussagen bezüglich der Herstellung von Brückenlagern finden sich nicht. Die Anforderungen galten über den Brückenbau hinaus und waren inhaltlich in weiten Passagen deckungsgleich mit den *Normalbedingungen*.

5.3.3 Regelwerke der Staatseisenbahnen

Die ab den 1880er-Jahren für die einzelnen Ländereisenbahnen erschienenen Vorschriften konkretisierten sukzessive die Forderungen bzgl. der Brückenlager. Die maßgeblichen Impulse kamen hierbei aus Bayern und aus Preußen.

Die 1895 in Bayern veröffentlichten *Grundlagen für die Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen* enthielten präzise Angaben zur konstruktiven Ausbildung von Brückenlagern (K7- 11). In den nachfolgenden Ausgaben wurden die Angaben teilweise modifiziert, neu war ab 1900 ein Verweis auf die zur Jahrhundertwende in Bayern erschienenen *Normalien* für Brückenlager, welche die Gestaltung und Dimensionierung unterschiedlich großer Brückenlager sowie deren Befestigung auf der Auflagerbank bereits im Sinne einer Norm regelten (K8 - 2).

Für den Bereich der Preußischen Staatseisenbahn erließ der Minister für öffentliche Arbeiten¹⁴² 1894 *Allgemeine Bestimmungen für die Ausbildung von Brückenlagern*. Anlass hierfür gaben die zur Prüfung vorgelegten Brückenentwürfe, bei denen die Lagerausbildung oft we-

¹⁴¹ Diese gingen 1921 [577/S.61] in DIN 1000 auf [475/S.373].

¹⁴² Dem Minister für Öffentliche Arbeiten oblag die obere Aufsicht u. Leitung des Eisenbahnwesens [524/S.179].

sentliche Mängel zeigte [471/Vorwort zum Erlass I 12757]. Die erarbeiteten Grundsätze lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Verwendung einfacher gedrungener Formen;
- Ausbildung der unteren Lagerplatte aus einem einzigen starken Gussstück;
- Kipplager sind bevorzugt als Zylinderzapfen-Kipplager auszubilden; die Ausbildung der Kippvorrichtung als Halbzapfen ist aus Gründen der Fertigung ungünstig; bei kleineren Spannweiten auch Berührungs-Kipplager möglich;
- Walzen sind den Stelzen vorzuziehen; eine Vorrichtung zur Lagesicherung der Stelzen wird empfohlen;
- einer Ansammlung von Schmutz und Wasser solle durch eine geeignete Anordnung vorgebeugt werden; Beaufschlagung mit Regen- und Spritzwasser sei möglichst zu vermeiden und auf die einfache Zugänglichkeit zu Wartungszwecken sei zu achten (K8 - 1).

Auf diese Grundsätze bezogen sich alle nachfolgenden Vorschriften der Preußischen Bahn (vgl. K7- 19, K7- 20, K7- 24, K7- 25). Im Wesentlichen sollten sie in dem Regelwerk der späteren Deutschen Reichsbahn aufgehen.

Nachfolgende Tabelle fasst die Entwicklung der Forderungen in den Bestimmungen der einzelnen Staatsbahnen bezüglich Konstruktion und Gestaltung von Brückenlagern zusammen.

Tab. 5: Entwicklung der Anforderungen an Konstruktion und Gestaltung in den Bestimmungen der Länderbahnen

	Jahr	Verweis	
Preußen	1894	Für Lagerteile sind einfache gedrungene Formen zu wählen; Ausführung als Kipplager, hier aber als Zapfen-, nicht als Halbzapfen-Kipplager, bei kleineren Brücken als Berührungkipplager (vgl. dazu 4.3.2); Walzen sind Stelzen vorzuziehen. Wenn Stelzen, dann Lagesicherung empfohlen	K8 - 1
	1895	keine Angaben	K7- 10
	1899	keine Angaben	K7- 16
	1903	wie 1894	K7- 19
	1912	wie 1894	K7- 24
	1913	wie 1894	K7- 25
Bayern	1895	Oberfläche gusseiserner Lagerplatten immer einachsig gewölbt, u.U. auch zweiachsig gewölbt auszuführen, um Durchbiegungen des Überbaus zwängungsfrei zu ermöglichen; Längenänderungen des Überbaus sind durch bewegliche Lager zu gewährleisten, Anzahl der Walzen mind. n=4; bei geneigten Brücken festes Auflager am unteren Brückenende	K7- 11
	1900	Normalien für Brückenlager zur Regelung der konstruktiven Durchbildung der Brückenlager unterschiedlicher Größe	K8 - 2
	1900	Prinzipiell wie 1895, aber jetzt Verweis auf Normalien	K7- 17
Sachsen	1908	Prinzipiell wie 1895, mit Verweis auf Normalien	K7- 22
	1895	Flächen, die in gegenseitige Berührung kommen, sind passgenau abzuhebeln bzw. abzu-drehen	K7- 13

Baden	1903	Bei Brücken ab 20m Stützweite sind Rollen- oder Pendellager vorzusehen	K7- 18
Württemberg	1904	Brückenlager müssen eine gleichmäßige Abgabe des Auflagerdrucks aus dem Überbau in den Unterbau gewährleisten	K7- 21

Tab. 5 verdeutlicht die Vorreiterrolle der Bahnverwaltungen in Preußen und Bayern. Ausschlaggebend dafür waren aus Sicht des Verfassers das Wirken GERBERS in Bayern und SCHWEDLERS in Preußen. Ohne Zweifel hatten diese beiden großartigen Ingenieure ihren Einfluss auf die Erarbeitung der relevanten Vorschriften der Staatseisenbahnen ihrer Länder; die Verantwortlichkeit GERBERS für die Erarbeitung der *Normalien* in Bayern ist belegt¹⁴³. Hatte GERBER seinerzeit die Idee der von WERDER für die Großhesseloher Brücke entwickelten Berührungs-Kipplager aufgegriffen und diesen Lagertypus zeit seines Wirkens auch angewendet, so bevorzugte SCHWEDLER immer die Zapfen-Kipplager [204/S.87]. Diese Tradition spiegelt sich auch in den jeweiligen Ländervorschriften wider – beziehen sich die bayerischen Bestimmungen auf die Anwendung von Berührungs-Kipplagern, so verweisen die preußischen auf Zapfen-Kipplager.

Interessanterweise wurde schon Ende des 19. Jahrhunderts – parallel zur Erarbeitung von Neubauvorschriften – die Prüfung von Bestandsbauwerken bauaufsichtlich geregelt (siehe K7- 14). Zumindest im Zuständigkeitsbereich der Preußischen Staatseisenbahnen war ab 1895 im Rahmen der jährlichen Brückenprüfungen zu kontrollieren,

„[...] ob die Auflager, namentlich die stählernen und gusseisernen Theile derselben, Brüche oder Sprünge zeigen, ob die Rollen- oder Pendelsätze richtig liegen und wirken, ob die Roll- oder Gleitflächen der Platten frei von Schmutz und Wasser sind und ob eine allseitige Berührung einerseits zwischen den Trägern und den Auflagertheilen, andererseits zwischen den eigentlichen Lagerplatten und den Auflagersteinen stattfindet“ [393/§5, P.2].

Bezüglich der Bemessung von Lagerbauteilen kamen die präziseren Angaben wiederum aus Bayern – siehe Tab. 6. Zwar wagten Sachsen und Preußen als vermutlich erste Staatseisenbahnen den Vorstoß, in ihren Vorschriften „zulässige Beanspruchungen“ zu definieren¹⁴⁴, diese beschränkten sich aber prinzipiell auf allgemeine Angaben zu Druck- und Zugspannungen, ohne dabei auf die Dimensionierung beweglicher Lagerteile einzugehen. Die bayeri-

¹⁴³ Siehe [499/S.76].

¹⁴⁴ Dieses wurde von der Fachwelt nicht in jedem Fall begrüßt – siehe dazu in [451/S.49f].

schen Vorschriften hingegen benennen schon 1895 einen bei der Berechnung anzusetzen- den Reibungskoeffizienten. Darüber hinaus geben sie auch eine Formel zur Dimensionie- rung der Lagerwalzen an, die trotz der damals aktuellen Diskussion der Walzendimensionie- rung in der Fachwelt bis zum Übergang der Staatseisenbahn in die Deutsche Reichsbahn unverändert bleiben sollte – vgl. dazu Abschnitt 6.1.

Tab. 6: Entwicklung der Angaben zur Bemessung von Brückenlagern in den Bestimmungen der Länderbahnen

	Jahr		Verweis
Preußen	1894	Obere Lagerplatte ist auf Biegung zu bemessen	K8 - 1
	1895	keine Angaben	K7- 10
	1899	keine Angaben	K7- 16
	1903	wie 1894	K7- 19
	1912	wie 1894	K7- 24
	1913	wie 1894	K7- 25
Bayern	1895	Untere Lagerplatte hat den Druck auf das Auflagermauerwerk auf 2,0...3,0 t/dm ² zu be- grenzen Koeffizient der Gleit- und Wälzreibung von 0,25 ist bei der Berechnung wichtiger Überbau- teile zu berücksichtigen Grundfläche der Lagerwalzen muss dem 20-fachen der reduzierten Auflagerkraft entspre- chen	K7- 11
	1900	Angaben von 1895 modifiziert: Zulässige Belastung des Auflagermauerwerks jetzt bis 6,0 t/dm ² bei großen Brücken	K7- 17
	1908	wie 1900	K7- 22
Sachsen	1895	Angabe von zulässigen Spannungen, auch für bei Brückenlagern verwendete Werkstoffe wie Gusseisen und Gussstahl, keine Angaben aber zu Kontaktspannungen	K7- 13
Baden	1903	Angabe detaillierter Werte für zulässige Spannungen – auch für Gusseisen, Angaben zur Bemessung der Unterlagsplatte und des Kippzapfens, keine Angaben zu Kontaktspan- nungen	K7- 18
Württemberg	1904	keine Angaben	K7- 21

5.3.4 Regelwerke der Deutschen Reichs- und Bundesbahn

Mit der 1920 gegründeten Deutschen Reichsbahn wurde auch die Vereinheitlichung aller Bestimmungen, Verordnungen und Vorschriften notwendig [450/S.306]. Waren die bis dahin für die einzelnen Staatsbahnen geltenden Regelwerke sowohl bezüglich ihres Inhalts als auch ihres strukturellen Aufbaus recht verschieden gewesen, so wurde für die neuen Reichsbahnvorschriften folgende Struktur vorgesehen¹⁴⁵ [476/S.30]:

- Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken
- Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken
- Unterhaltung, Überwachung und Prüfung der eisernen Eisenbahnbrücken

Tab. 7 listet die dazu bis zur Trennung der Deutschen Reichsbahn in die Deutsche Bundesbahn (BRD) und Deutsche Reichsbahn (DDR) als Ergebnis des Zweiten Weltkrieges veröffentlichten Regelwerke auf. Die nachfolgenden Tabellen werten die genannten Vorschriften bezüglich ihrer Angaben zu den Brückenlagern aus. Die *Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken (BE)* regelten hierbei die zulässigen Spannungen innerhalb der Lagerteile sowie die bei der Berechnung anzusetzenden Reibungswiderstände der beweglichen Lager.

Tab. 7: Vorschriften für Eisenbauwerke der Deutschen Reichsbahn

	Jahr		Verweis
Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen (BE)	1922	1. Auflage (als vorläufige Fassung) „Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken“	K7- 27
	1925	2. Auflage „Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken (BE)“ mit extra Anhang „Besondere Bestimmungen für das Nachrechnen und für die Verstärkung eiserner Brücken“	K7- 30
	1934	3. Auflage, nun als DV 804 „Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE)“, analog dazu mit umbenanntem Anhang: „Besondere (...) für bestehende stählerne Brücken“	K7- 37
	1937 1939	verschiedenen Nachdrucke der 3. Auflage (1934) jeweils unter Einarbeitung von Berichtigungsblättern	K7- 42 K7- 43
	1940 1942 1944		K7- 47

¹⁴⁵ Hier Begrenzung auf aus statisch-konstruktiver Sicht relevante Punkte.

Grundsätze für die bauliche Durchbildung (GE)	1925	1. Auflage als „Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken (GE)“	K7- 31
	1931	2. Auflage der „Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken (GE)“	K7- 35
	1938	3. Auflage als DV 805 „Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE)“	K7- 40
	1940 1943	Nachdrucke der 3. Auflage jeweils unter Einarbeitung von Berichtigungsblättern	K7- 46
Unterhaltung, Überwachung und Prüfung (A St Bau) (B.Ü.P.)	1929	1. Auflage als A St Bau „Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (A St Bau)“	K7- 33
	1937	2. Auflage, nun als Bau St und DV 806 „Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St)“	K7- 39
	1940	Nachdruck der 2. Auflage (1938) unter Einarbeitung von Berichtigungsblättern	K7- 44
	1926	1. Auflage als B.Ü.P. „Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der Brücken, Hallen und Dächer (B.Ü.P.)“	K7- 32
	1940	2. Auflage als DV 803	

Tab. 8: Entwicklung der zulässigen Materialspannungen eiserner Lagerteile in den *BE* in kg/cm²

Jahr		Lastfall H			Lastfall HZ			Verweis
		Biegezug	Biegedruck	Druck	Biegezug	Biegedruck	Druck	
1922								K7- 27
	Gusseisen	400	800	900	450	900	1000	
	Stahlguss	1200	1200	1500	1300	1300	1600	
	Schmiedestahl	1400	1400	1700	1500	1500	1900	
Beim Nachrechnen bestehender Brücken können die Werte um 25% erhöht werden.								
1925	GE 15.90	450	900	1000	500	1000	1100	K7- 30
	Stg 52.81	1800	1800	1800	2000	2000	2000	
	St C 35.61	2000	2000	2000	2200	2200	2200	
Beim Nachrechnen bestehender Brücken können die Werte um 10% erhöht werden.								
1937 bis 1944	Keine weiteren nennenswerten Änderungen							K7- 42 K7- 47

Tab. 9: Entwicklung der zulässigen Kontaktspannungen in den *BE* in kg/cm²

Jahr		Lastfall H	Lastfall HZ	Verweis
1922	Gusseisen	4000		K7- 27
	Flusseisen	5000		
	Stahlformguss	6500		
	Schmiedestahl	7500		
Bei Verwendung von mehr als 2 Rollen sind die Werte um 1000 kg/cm ² zu verringern. Beim Nachrechnen bestehender Brücken können die Werte um 25% erhöht werden.				
1923	Erllass des Reichsverkehrsministers als Ergänzung zu den <i>BE</i>			
	Gusseisen	5000		K7-28
	Flusseisen	6500		
	Stahlformguss	8500		
	Schmiedestahl	9500		
Bei Verwendung von mehr als 2 Rollen sind die Werte um 1000 kg/cm ² zu verringern. Beim Nachrechnen bestehender Brücken können die Werte um 25% erhöht werden.				
1925	Gusseisen Ge 15.90	5000	6000	K7- 30
	Flusseisen St 37	6500	8000	
	Stahlformguss Stg 52.81	8500	10 000	
	Schmiedestahl St C 35.61	9500	12 000	
Bei Verwendung von mehr als 2 Rollen sind die Werte um 1000 kg/cm ² zu verringern. Beim Nachrechnen bestehender Brücken können die Werte um 25% erhöht werden.				
1937	Keine weiteren nennenswerten Änderungen			K7- 42
bis				K7- 47
1944				

Tab. 10: Entwicklung der Angaben zu den Reibungswiderständen in den *BE*

Jahr	Reibungswiderstände		Verweis
1922	Gleitend 0,2	Rollend 0,03	K7- 27
1925	Gleitend 0,2	Rollend 0,03	
	Sind i.d.R. nicht bei der Berechnung der Hauptträger, sondern nur bei der Berechnung von Lagern und des Unterbaus zu berücksichtigen		K7- 30
1934	Keine nennenswerten Änderungen mehr		K7- 37
bis			K7- 47
1944			

Die Auswertung von Tab. 8 bis Tab. 10 verdeutlicht, dass sich im Untersuchungszeitraum die Bemessungsgrundlagen für die Lagerdimensionierung innerhalb der *BE* kaum änderten. Die Angaben zu den Reibungswiderständen blieben praktisch seit der vorläufigen Fassung von 1922 unverändert. Die Werte der zulässigen Spannungen des Lagermaterials als auch der zulässigen Kontaktspannungen wurden 1925 gegenüber der vorläufigen Fassung teilweise deutlich erhöht, später kam es jedoch bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges zu keinen nennenswerten Änderungen der Berechnungsgrundlagen mehr. Leider ließ sich aus der dem Verfasser vorliegenden Literatur nicht erschließen, womit die genannten Erhöhungen nach

1922 innerhalb so kurzer Zeit begründet wurden, in Fachkreisen wurden sie jedoch auch kritisch hinterfragt¹⁴⁶. Darüber hinaus blieb zunächst noch unvermittelt, nach welcher Formel die Kontaktspannungen in den Berührungsflächen zu ermitteln seien. Zwar waren um 1920 die HERTZ'schen Formeln als Grundlage für die Berechnung der Wälzkörper bereits etabliert, der Punkt 6.1 dieser Arbeit wird aber zeigen, dass bis in die 1920er-Jahre hinein durchaus noch empirische Faustformeln für die Dimensionierung von Lagerwalzen zur Anwendung kamen. Erst die dritte Auflage der *BE* von 1934 gab den expliziten Hinweis, dass sich die angegebenen zulässigen Spannungen auf die Berechnung nach HERTZ beziehen.

Fanden sich in der vorläufigen Fassung der *BE* noch vereinzelt Hinweise auf den Umgang mit bestehenden Brücken, so wurden ab 1925 die Ausgaben der *BE* um eine gesonderte Anlage *Besondere Bestimmungen für das Nachrechnen und für die Verstärkung eiserner Brücken* ergänzt, die auch aus heutiger Sicht interessante Aussagen zum Umgang mit bestehender Brückenlagertechnik enthielten. Danach durften die Werte für zulässige Materialspannungen ohne weitere Einschränkung um 10% – die der zulässigen Kontaktspannungen um 25% – erhöht werden. Lager bestehender Brücken waren nur dann auszuwechseln, wenn diese für den Betrieb gefährliche Schäden aufwiesen [413/S.52].

Tab. 11: Entwicklung der Angaben zu Brückenlagern in den *GE*

Jahr	Verweis
1925	K7- 31
bei Brücken im Gefälle festes Auflager am unteren Ende der Brücke feste/bewegliche Lager grundsätzlich als Kipplager ausführen, bei breiten Brücken Rotation und Translation auch in Querrichtung gewährleisten ab 12 t Auflagerdruck bzw. ab 12 m Stützweite bewegliche Lager als Rollen-, Pendel- oder Stelzenlager, möglichst als Einrollen- oder Pendellager und möglichst Rollenlager anstatt Pendellager möglichst geringe/gerade Anzahl von Rollen/Stelzen, wenn angängig, Einrollen- o. Pendellager Rollen- bzw. Pendellager mit Lagersicherung, Stelzenlager mit Sicherung gegen Umfallen möglichst einfache, gedrungene Form verwenden bei beweglichen Lagern Ansammlung von Schmutz und Wasser vermeiden bequeme Zugänglichkeit gewährleisten	
1931	K7- 35
keine weiteren wesentlichen Änderungen, Walzen- bzw. Stelzenlager nun aber schon ab 10 m Spannweite empfohlen	
1938	K7- 40
1943	K7- 46

¹⁴⁶ Zum Beispiel 1926 von GEHLER in seinem Kommentar zu den *BE* in [455/S.68]. GEHLER selbst war mit dem Thema „Brückenlager“ gut vertraut, hatte er doch noch vor dem Ersten Weltkrieg eigene Versuche zum Reibungswiderstand von Brückenlagern angestellt (vgl. K3- 4), und an seinem Lehrstuhl entstand KOLLMARS Dissertation zu Brückenlagern (siehe [57]); [455/S.67, Fußnote], [566/S.154].

Wie schon die *BE*, so schrieben auch die *Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken (GE)* die wesentlichen Forderungen bereits in der Erstausgabe von 1925 fest. Ein Vergleich mit den Angaben in Tab. 5 veranschaulicht auch hier den Einfluss der alten Ländervorschriften aus Preußen und Bayern.

Gegenüber den Angaben in den früheren Ländereisenbahnen wurde dem Fortschritt bei der Entwicklung der Brückenlagertechnik Rechnung getragen. Hinweise, die sich auf die Anwendung der inzwischen veralteten Flächenlager bezogen, entfielen. Zudem gab es grundsätzliche Neuerungen, so vor allem die Tendenz hin zu einer möglichst geringen Walzenanzahl bis hin zur Forderung, nach Möglichkeit Einrollenlager zu verwenden. Die Hintergründe dafür werden im Punkt 6.1 zu diskutieren sein.

Abweichend von den *BE* und *GE* wurde der bei der Strukturierung der Reichsbahnvorschriften vorgesehene Punkt „Unterhaltung, Prüfung und Überwachung“ nicht in einer einzigen Vorschrift erfasst. Hierbei wurde unterschieden einerseits zwischen der Überwachung des Bauzustands und andererseits der Überwachung des in Nutzung befindlichen Bauwerks. Auf ersteres bezog sich die *Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (A St Bau*, später *Bau St*), letzteres regelten die *Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der Brücken, Hallen und Dächer (B.Ü.P.)* – vgl. Tab. 12.

In der die Bauausführung regelnden *A St Bau* wurde der Einbau der Brückenlager in drei wesentlichen Punkten beschrieben. Der erste Punkt wies darauf hin, vor dem Einbau die Geometrie und die Bearbeitung der Lagerteile zu prüfen. Der zweite Punkt regelte die Berücksichtigung der Aufstelltemperatur bei der Justierung der beweglichen Lager. Ein letzter, ausführlicher Punkt beschrieb die Feinjustierung der Lager bzgl. ihrer Einbauhöhe und ihrer Lage zum Überbau. Auch hierbei konnte man sich auf entsprechende Hinweise in den früheren Vorschriften der Staatseisenbahnen stützen, wo selbige Punkte bereits geregelt worden waren. Die drei bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges erschienenen Ausgaben der *A St Bau* sollten sich bzgl. ihrer Anmerkungen zu den Brückenlagern nicht unterscheiden.

Tab. 12: Zusammenfassung der Angaben in der *A St Bau*

	Jahr		Verweis
A St Bau	1929	vor dem Einbau Kontrolle der Lagergeometrie, Lagerjustierung bei +10°C, dann mittige Lagerstellung, bei Kugel-Kipplagern passgenaue Hartblei-Unterlage aufbringen bei Zylinderkipplagern Bleiunterlage ungünstig, hier Lager auf Keilen zwischenlagern, passgenau zum Überbau einstellen und schließlich satt mit Zementmörtel unterstopfen, anschließend Keile entfernen Einbau und Funktionstüchtigkeit der Brückenlager sind bei der Abnahme des Bauwerks zu prüfen	K7- 33
	1937	keine weiteren wesentlichen Änderungen	K7- 39
	1940		K7- 44

Die 1926 in der Erstauflage erschienenen *Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der Brücken, Hallen und Dächer (B.Ü.P.)* konnten sich ebenfalls auf Erfahrungen mit einer entsprechenden Vorschrift der früheren Preußischen Bahnverwaltung stützen, denn bereits 1895 waren die *Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der eisernen Brücken im Bereiche der Preußischen Staatseisenbahnverwaltung* (K7- 14) eingeführt worden. Letztere gaben bereits die grundsätzliche Struktur vor, an der sich die *B.Ü.P.* orientieren konnte: Organisation der Bauwerksakten, Jahresprüfungen, Hauptprüfungen, Belastungsproben. Bezüglich der Prüfungsfristen hatte die Preußische Bahnverwaltung noch jährliche Überprüfungen und Hauptprüfungen spätestens alle fünf Jahre vorgeschrieben – Fristen, die die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft in ihren *B.Ü.P.* auf zwei bzw. sechs Jahre verlängerte. Tab. 13 stellt die Forderungen beider Vorschriften im Zuge der Brückenprüfungen gegenüber, welche sich auf die Brückenlager beziehen. Hierbei fällt auf, dass die vergleichsweise detaillierten Angaben in den preußischen *Vorschriften* auf einige wenige Stichpunkte in den *B.Ü.P.* reduziert wurden. Die Gründe hierfür ließen sich aus der zur Verfügung stehenden Literatur nicht erschließen. Es überrascht jedoch insofern, da laut einer in den frühen 1920er-Jahren in der Fachpresse stattgefundenen Diskussion über das Brückenüberwachungs- und Unterhaltungswesen Lagerbrüche im Zuge der Jahresprüfungen offenbar häufig unbeachtet blieben [466/S.206].

Tab. 13: Gegenüberstellung der Forderungen zu Lagerprüfungen in den preußischen *Vorschriften* und den *B.Ü.P.*

Preußische Vorschriften für die Überwachung und Prüfung..., 1895	B.Ü.P., 1926
[...] zu prüfen, ob die Auflager, namentlich die stählernen und gusseisernen Theile derselben, Brüche oder Sprünge zeigen, ob die Rollen- oder Pendelsätze richtig liegen und wirken, ob die Roll- oder Gleitflächen der Platten frei von Schmutz und Wasser sind und ob eine allseitige Berührung einerseits zwischen den Trägern und den Auflagertheilen, andererseits zwischen den eigentlichen Lagerplatten und den Auflagersteinen stattfindet. [393/S.142]	[...] zu prüfen, ob die Lager Schäden zeigen, ob die Rollen oder Pendel richtig stehen und wirken, ob die Lager bei der Überfahrt der Züge hämmern. [415/S.10]

5.3.5 Regelwerke für Straßenbrücken

Bei der Normung von Straßenbrücken wurde die Gliederung der bestehenden Regelwerke der Eisenbahn weitgehend übernommen¹⁴⁷. Tab. 14 veranschaulicht die Parallelität bezüglich der Struktur und der Bezeichnungen der Regelwerke für Bahn- und Straßenbrücken.

¹⁴⁷ Vor der Einführung von DIN-Normen explizit zur Regelung von Straßenbrücken in den 1920er-Jahren wurden auch für Straßenbrücken oft die Regelwerke der Bahn angewendet [482/S.195].

Tab. 14: Gegenüberstellung der Bezeichnungen und der Erscheinungsjahre der Regelwerke für Eisenbahn- und Straßenbrücken im Untersuchungszeitraum

Eisenbahnbrücken, nach Tab. 7		Straßenbrücken, nach [475]	
		Abmessungen – DIN 1071	1. Ausg. 4/1923*
		Belastungsannahmen – DIN 1072	1. Ausg. 07/1925
Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken – DV 804	1. Ausg. 01/1922 (Entwurf) 2. Ausg. 02/1925 3. Ausg. 02/1934 4. Ausg. 01/1939	Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken - DIN 1073***	1. Ausg. 04/1928 2. Ausg. 09/1931 3. Ausg. 01/1941
Unterhaltung, Überwachung und Prüfung der eisernen Eisenbahnbrücken – DV 806	1. Ausg. 07/1929 2. Ausg. 10/1937	Richtlinien für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken - DIN 1076****	Entwurf 1. Ausg. 08/1930
Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken – DV 805	1. Ausg. 09/1925 2. Ausg. (?) 3. Ausg. 11/1938	Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Straßenbrücken - DIN 1079	Entwurf 1934** 1. Ausg. 01/1938 2. Ausg. 11/1938
* nach [482/S.193]		*** für hölzerne/massive Brücken – DIN 1074/DIN1075	
** nach [481/S.399]		**** für massive Brücken DIN 1077	

Auf eine detaillierte Auswertung der Normen für Straßenbrücken bezüglich der Forderungen für Brückenlager kann an dieser Stelle verzichtet werden, da die vergleichbaren Normen für Bahn- und Straßenbrücken teilweise im Wortlaut übereinstimmten und sich nur im Detail voneinander unterschieden. Die Vorschriften der Bahn dienten dabei als Vorbild, konnte man doch bei deren Einführung in den 1920er-Jahren inzwischen auf Erfahrungen aus einem halben Jahrhundert beim Bau von Bahnbrücken sowie aus diversen Regelwerken der früheren Ländereisenbahnen zurückgreifen. Die Gegenüberstellung der Regelwerke in Tab. 14 verdeutlicht den Vorbildcharakter der Bahnvorschriften, der jeweils im früheren Veröffentlichungsdatum gegenüber der vergleichbaren Straßenbrückennorm sichtbar wird. Das mitunter Formulierungen identisch waren, hatte dabei auch einen ganz pragmatischen Hintergrund: Es lag die Verantwortung bei der Bearbeitung sowohl der Bahn- als auch der Straßenregelwerke oft in denselben Händen¹⁴⁸.

5.3.6 Ausblick auf die Entwicklung nach dem Untersuchungszeitraum

Nach der Gründung zweier deutscher Staaten trat 1949 im Bereich der Bundesrepublik Deutschland die Deutsche Bundesbahn (DB) und im Bereich der Deutschen Demokratischen Republik die Deutsche Reichsbahn (DR) das Erbe der „ursprünglichen“ Deutschen Reichs-

¹⁴⁸ Die hier behandelten Regelwerke entstanden im Wesentlichen unter der Verantwortung von Dr.-Ing. SCHAPER und Dr.-Ing. KOMMERELL, siehe dazu [475], [450/S.306], [455/S.69].

bahn an. Wie bereits im Punkt 4.3 erläutert, verloren die in dieser Arbeit thematisierten gusseisernen und stählernen Brückenlager in der zweiten Jahrhunderthälfte an Bedeutung. Die Lager kamen zwar weiterhin zur Anwendung, die Forschungstätigkeit konzentrierte sich jedoch besonders in der BRD auf die Einführung hochfester Stähle in der Brückenlagertechnik. Die Angaben in den Normen beschränkten sich weiterhin auf die Nennung zulässiger Spannungen bereits etablierter Materialien. Die nachfolgenden Tabellen zeigen exemplarisch Werte in den Regelwerken der DB (Tab. 15) und der DR (Tab. 16) in den 1960er-Jahren.

Tab. 15: Zulässige Spannungen für Lagerteile und Gelenke [kg/cm²] aus DV 804 der DB von 1965, nach [440/Übersicht 40.1f]

Spannung	GG 14		Grauguss GG 18		GG 22		Baustahl St 37		Stahlguss GS 52.1		Vergütungsstahl C 35 N	
	H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ
Druck	1000	1100	1200	1300	1400	1500						
Biegezug	450	500	550	600	650	700	1400	1600	1800	2000	2000	2200
Biegedruck	900	1000	1100	1200	1300	1400						
Nach Hertz	5000	6000	6000	6500	7000	7500	6500	8000	8500	11000	9500	12000

Bei beweglichen Lagern mit mehr als zwei Walzen sind diese Werte um 1000 kg/cm² zu ermäßigen.

Tab. 16: Zulässige Spannungen für Lagerteile [kp/cm²] aus Dv 804 der DR von 1963, [439]

Spannung	Baustahl St 38			Baustahl St 52			Stahlguss GS 50.1			Vergütungsstahl C 35		
	H	HZ	HZS	H	HZ	HZS	H	HZ	HZS	H	HZ	HZS
Zug u. Druck	1400	1600	1800	2100	2400	2700	1800	2050	2300	2000	2200	2400
Schub	810	920	1040	1210	1390	1560	1040	1180	1330	1160	1270	1390
Vergleichssp.	1600	1700	1800	2400	2550	2700	2000	2150	2300	2200	2300	2400
Nach Hertz	6500	7000	7500	9000	9600	10200	9000	9600	10200	9000	9600	10200

Bei beweglichen Lagern mit mehr als zwei Walzen sind diese Werte um 1000 kp/cm² zu ermäßigen.

Auffallend beim Vergleich der beiden Tabellen sind die sehr differenzierten Angaben in Dv 804/DR, die sich auch auf Angaben zum Lastfall HZS (Haupt-, Zusatz- und Sonderlasten) bezogen¹⁴⁹ sowie die Tatsache, dass die Dv 804/DR hochfestem Baustahl, Stahlguss und Vergütungsstahl ohne Differenzierung jeweils die gleichen zulässigen HERTZ'schen Spannungen zuwies.

¹⁴⁹ Die Zuordnung verschiedener Lasten zu Lastfällen ist in den Regelwerken der DR und DB vergleichbar.

Die bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges bei der Nachrechnung von Bestandsbauwerken zugelassene pauschale Erhöhung der zulässigen Spannungen wurde weder in die Vorschriften der BRD noch in diejenigen der DDR übernommen. Für das Nachrechnen bestehender Brücken erschienen jeweils eigene Regelwerke – im Bereich der DB die *Vorläufigen Richtlinien und Erläuterungen für das Nachrechnen bestehender Eisenbahnbrücken und die Zulassung von Betriebslastzügen vom 1. Oktober 1951* [462/S.4], für die DR (DDR) die *Richtlinien für das Nachrechnen stählerner Eisenbahnbrücken als DV 804/100* im Oktober 1966.

Nach der Wiedervereinigung beider deutscher Staaten übernahm die neue Richtlinie *DS 805* die Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahnbrücken im Netz der Deutschen Bahn AG – gebildet 1994 aus der Deutschen Bundesbahn und der Deutschen Reichsbahn der DDR.

Tab. 17 fasst die Entwicklung der zulässigen HERTZ'schen Spannungen in den Regelwerken für vergleichbare Werkstoffe zusammen. Während die DB im Wesentlichen die historischen Vorgaben aus den Erstaufgaben der *BE* übernahm, wurden für den Bereich der DR die zulässigen Kontaktspannungen für höherwertige Materialien oft vorsichtiger angesetzt.

Tab. 17: Entwicklung der zulässigen HERTZ'schen Spannungen für vergleichbare Werkstoffe [t/cm²]

	Grauguss GG 14/15				Baustahl St 37/38				Stahlguss GS 50/52				Vergütungsstahl St C 35				Quelle				
	H		HZ		H		HZ		H		HZ		H		HZ						
1922	4,0				5,0				6,5				7,5				[409/S.38]				
1923	5,0				6,5				8,5				9,5				[410/S.363]				
1925	5,0		6,0		6,5		8,0		8,5		10		9,5		12		[413/Tafel 19]				
1934	5,0		6,0		6,5		8,0		8,5		10		9,5		12		[422/Tafel 23]				
	DR	DB	DR	DB	DR	DB	DR	DB	DR	DB	DR	DB	DR	DB	DR	DB					
1963					6,5		7,0		9,0		9,6		9,0		9,6		[439/T.40.1.6]				
1965		5,0		6,0		6,5		8,0		8,5		11		9,5		12		[440/Ü. 40.1f]			
1966	5,0		6,0		6,5		7,0										[441/Tafel 1a]				
1979					6,5		7,0		9,0		9,6		9,0		9,6		[444/Tafel 19]				
		DB AG					DB AG					DB AG					DB AG				
1997		7,5*					9,5*					12,5*					12,0*				[447/P.0103(2)]

* Charakteristische Werte, nicht direkt vergleichbar mit den Angaben zu zulässigen Spannungen

5.3.7 Regelwerke zu Brückenlagern

Wenngleich erste eigenständige Normen zu Brückenlagern erst im späten 20. Jahrhundert erschienen, so reichen die Anfänge der Normierungsarbeiten zu Brückenlagern jedoch bis ins 19. Jahrhundert zurück. Hier seien zuallererst die bereits 1894 für den Bereich der Preu-

ßischen Staatsbahnen herausgegebenen und bereits besprochenen *Allgemeinen Bestimmungen über die Ausbildung der Lager eiserner Brücken* genannt (K8 - 1), die als vermutlich erste Vorschrift zu Brückenlagern eine wichtige Grundlage für die bald darauf einsetzenden Normierungsarbeiten bildeten. Das Regelwerk war noch keine Norm – weder im heutigen noch im zeitgenössischen Verständnis¹⁵⁰. Die Ende des 19. Jahrhunderts unter GERBERS¹⁵¹ Leitung für die Bayerische Staatseisenbahn ausgearbeiteten *Normale für Auflager* (K8 - 2) hingegen regelten die Ausbildung von Brückenlagern bereits im Sinne einer Norm, deren Anwendung durch die *Vorschriften der Bayerischen Staatseisenbahnen für die Ausführung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen* verbindlich gefordert wurde (Abb. 73).

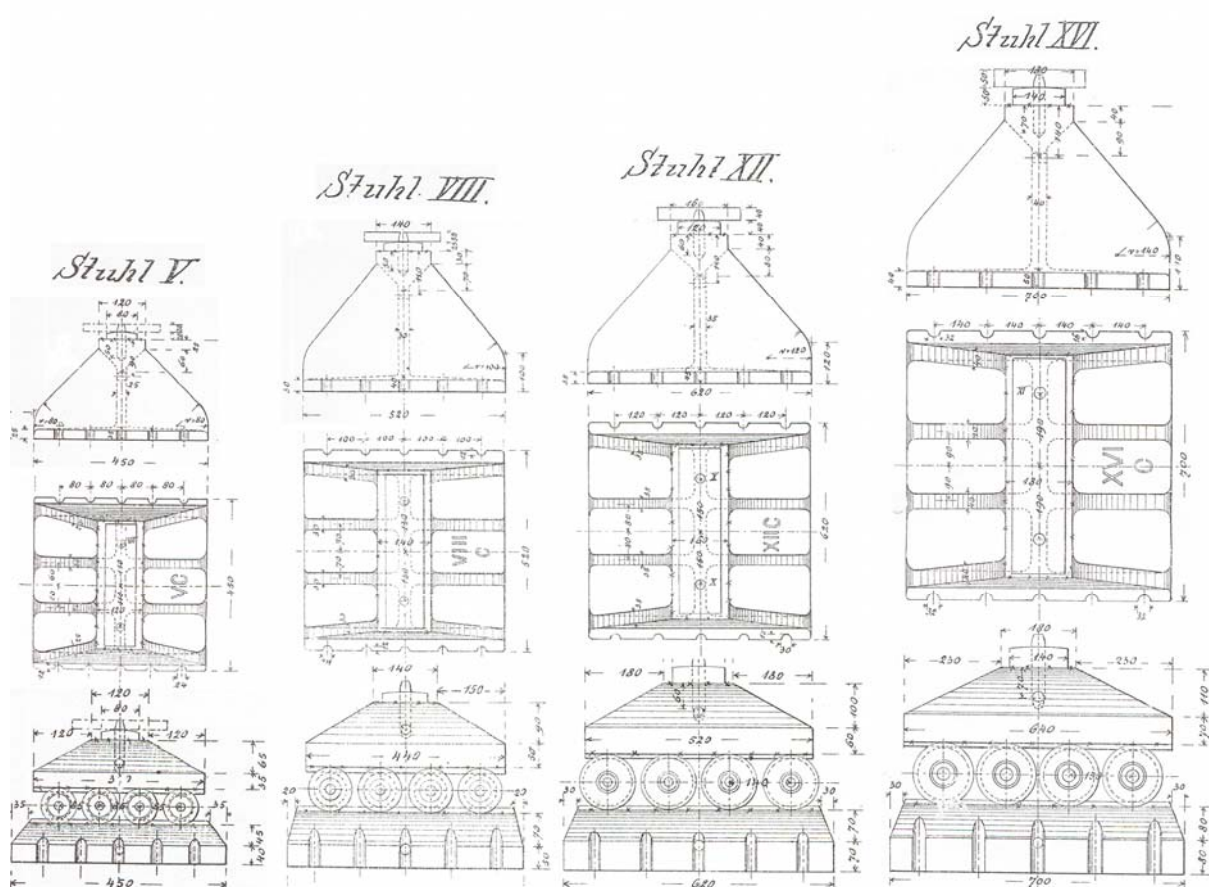


Abb. 73: Auszug aus den *Normalien* für Brückenlager [363]

¹⁵⁰ Durch den Minister für öffentliche Arbeiten verbindlich eingeführt, war deren Beachtung obligatorisch. Darüber hinaus ging es weniger darum, eine technisch nicht begründete Vielfalt zu steuern bzw. zu vereinheitlichen, sondern vor allem darum, durch Hinweise zur konstruktiven Ausbildung der Brückenlager fehlerhafte Konstruktionen zu vermeiden.

¹⁵¹ GERBER ist nicht explizit als Verfasser genannt, seine Verantwortung für die Ausarbeitung der *Normalien* erschließt sich aus dem Nachruf anlässlich seines Todes in [499/S.76].

Nach der Gründung des Normenausschusses der Deutschen Industrie 1917 und der daraufhin einsetzenden umfassenden Normungsarbeit im Bauwesen wurde zu Beginn der 1920er-Jahre vom Arbeitsausschuss für Eisenbrückenbau auch eine Norm für Brückenlager in Aussicht gestellt [473/S.2]. 1924 wurden zwei Normblattentwürfe *DIN E 1039* und *DIN E 1040* für feste und bewegliche Linienkipplager bis 300 t Auflagerdruck veröffentlicht (K8 - 3) und eine Normung der Kugelkipplager und Einrollenlager angekündigt [460/S.5]. Die Normungsarbeiten im Eisenbau, so auch die zu den Brückenlagern, wurden jedoch während der Inflationszeit abgebrochen und nicht weiter gefördert [474/S.62]. Erst im Februar 1933 erschien ein überarbeiteter Normblattentwurf unter Berücksichtigung der bis dato gemachten Erfahrungen, der jetzt auch Normblattentwürfe für feste und bewegliche Punktkipplager vorsah [468]. Nach einer Diskussion der Einsprüche konnte eine Veröffentlichung der Normblätter *DIN 1037* bis *DIN 1040* für 1934 avisiert und die Erarbeitung einer von vielen Seiten angelegten Norm für Einrollenlager in Aussicht gestellt werden [480/S.21]. Die angekündigten und praktisch vollständig bearbeiteten Normblattentwürfe sind offenbar jedoch nie als gültige Normen veröffentlicht worden. Warum an dieser Stelle die Normierungsarbeiten zu Brückenlagern vorerst abbrechen, bleibt Gegenstand für künftige Recherche¹⁵².

Erst nach dem Zweiten Weltkrieg wurden entsprechende Bemühungen fortgesetzt, zuerst in der DDR, wo wirtschaftliche Zwänge die Standardisierungsbestrebungen forcierten. Die fachlichen Impulse kamen hier vom Unternehmen „DR Stahlbau Dessau“¹⁵³, das den größten Teil der in der DDR produzierten stählernen Brücken fertigte. Bereits in den 1950er-Jahren hielt der Betrieb die Dienststellen der Deutschen Reichsbahn an, bei Entwurf und Ausführung der Brückenlager möglichst auf solche zurückzugreifen, für die Formen zur Herstellung vorhanden waren¹⁵⁴. Anschließend wurden aus diesem noch umfangreichen Sortiment Lager mit ähnlichen Abmessungen und Belastbarkeiten zu Werkstandards zusammengefasst [472]; ab 1963 waren alle Dienststellen der Deutschen Reichsbahn angehalten, sich bei Entwurf und Ausführung an dieser Lagerauswahl zu orientieren [477].

¹⁵² Eine Recherche ist bisher erfolglos geblieben. Anfragen im Beuth-Verlag (verantwortlich für Druck und Vertrieb der DIN-Normen) sowie in der Deutschen Nationalbibliothek Leipzig, der Bibliothek der Hochschule für Technik, Wissenschaft und Kultur Leipzig sowie in der Technischen Informationsbibliothek Hannover (verfügen über einen gut sortierten Bestand alter DIN-Normen) blieben ohne Erfolg. Nach Auskunft des DEUTSCHEN NORMENAUSCHUSSES (DNA) (Herausgeber der DIN-Normen) verfügt der DNA nicht über Archivalien, deren Recherche Auskunft über das weitere Vorgehen mit den beschriebenen Normenblattentwürfen geben könnte.

¹⁵³ Seit 1953 Teilbetrieb der Deutschen Reichsbahn.

¹⁵⁴ „DR Stahlbau Dessau“ verfügte über keine eigene Gießerei. Die Brückenlager wurden in der Stahlgießerei Karl-Marx-Stadt (Chemnitz) gegossen [652]. Die anschließend erforderliche mechanische Bearbeitung, z.B. der Kontaktflächen, erfolgte ab ca. 1975 im Werk der Gebrüder Haas in Bernsdorf (Oberlausitz) [649].

Diese Werkstandards wiederum bildeten die Grundlage für die 1969 eingeführte *Technische Norm, Güte- und Lieferbestimmung (TGL) 9098 „Linienkipplager“*, welche Festlager, Gleitlager, Einrollenlager und Zweirollenlager im Bereich von 60 bis 400 Tonnen Auflast bauaufsichtlich regelten. Eine zweite – offenbar bis zur Wiedervereinigung geltende – Auflage erschien im November 1974 und war ab Oktober 1975 verbindlich anzuwenden. Diese *TGL* umfasste drei Teile, welche Berechnungsgrundlagen (Teil 1), Abmessungen und Technische Lieferbedingungen (Teil 2) sowie den Tragfähigkeitsnachweis (Teil 3) thematisierten¹⁵⁵.

Während die Entwicklung der *TGL* zu Linienkipplagern offenbar an die Normierungsbemühungen der Zwischenkriegsjahre anknüpfte und diese schließlich zu einem fertigen Regelwerk weiterführte¹⁵⁶, hatte die im Mai 1972 eingeführte und ab Januar 1973 verbindlich anzuwendende *TGL 24 552 „Punktkipplager“* einen eigenständigen Ursprung. Hier gaben die seit den 1960er-Jahren im Brückenbau regelmäßig zur Anwendung kommenden stählernen Pendelstab-Stützen mit Punktkipplagern im Fuß- und Kopfpunkt den Ausschlag, Entwurf und Ausführung dieser Art Lager zu standardisieren¹⁵⁷. Neben den erwähnten *TGL*-Vorschriften zu Linienkipplagern und Punktkipplagern gab es aller Wahrscheinlichkeit nach noch eine *TGL* zu geschweißten Punktkipplagern [656], die dem Verfasser jedoch nicht vorlag.

Erst Ende der 1970er-Jahre wurde in der BRD die Erarbeitung einer Lagernorm, der *DIN 4141* begonnen, um die rasante Entwicklung in den Nachkriegsjahren auf dem Gebiet der Brückenlagertechnik auf eine neue bauaufsichtliche Grundlage zu stellen. *DIN 4141/T.1* erschien im September 1984, insgesamt konnten neun Teile der Norm – ein Teil als Vornorm – erarbeitet werden, bevor auf Grund der beginnenden europäischen Normungsarbeiten Ende der 1980er-Jahre die Arbeiten an *DIN 4141* eingestellt werden mussten [32/S.246]. Die Teile der *DIN 4141* „[...] waren konkurrenzlose Vorlagen bei der Schaffung der europäischen Normenreihe EN 1337“ [452/S.53]; der wesentliche Unterschied gegenüber *DIN 4141* beschränkte sich auf die Berücksichtigung des neuen Bemessungskonzepts. Um das Jahr 2000 wurde begonnen, die Teile der *EN 1337* sukzessive bauaufsichtlich einzuführen. Auf Grund von Verzögerungen bei deren Einführung erschienen Novellierungen einiger Teile der

¹⁵⁵ Vgl. zu den einzelnen Blättern die Quellen [370], [371], [372].

¹⁵⁶ Aus konstruktiver Sicht entsprechen die in der *TGL* genormten Linienkipplager den Entwürfen aus der Vorkriegszeit. Es ist also anzunehmen, dass man sich in der DDR an den *DIN*-Entwürfen aus den 1930er-Jahren orientierte.

¹⁵⁷ Grundlage war ein vermutlich im „DR Stahlbau Dessau“ beantragter Neuerervorschlag NV 26/3833-03/71 – vgl. [368/Erläuterungen], der in verschiedenen Arbeitsgruppen zunächst als Werksstandard im „Stahlbau Dessau“ eingeführt und auf Drängen staatlicher Institutionen zu einer *TGL* weiterentwickelt wurde [656].

alten *DIN 4141* als notwendig, die 2003 als Vornorm *DIN V 4141* erschienen, um jedoch mit der Einführung der entsprechenden Normenteile der europäischen Norm wieder hinfällig zu werden [452/S.52]. Einen zusammenfassenden Stand der Normensituation zu Brückenlagern geben [469] und [449]. Weder die alte *DIN 4141* noch die europäische Norm *EN 1337* machen nennenswerte Angaben zu den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern. Lediglich wird pauschal gefordert, diese Lager wenn möglich durch solche der neuen Lagergeneration zu ersetzen.

5.3.8 Wertung und Zusammenfassung

Die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager wurden in den Zeiten ihrer primären Anwendung durch die Regelwerke für den Brückenbau erfasst. Bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert ergab sich die Notwendigkeit, solche Regelwerke für die damaligen Ländereisenbahnen zu erarbeiten, um den Brückenbau im Zuge des sich ständig ausweitenden Eisenbahnnetzes durch verbindliche Vorschriften bauaufsichtlich zu fassen. Für den Bau von Brückenlagern für Straßenbrücken galten die Regelwerke der Bahn oft sinngemäß, bevor in den 1920er-Jahren erste DIN-Normen begannen, auch den Bau von Straßenbrücken bauaufsichtlich zu regeln. Hinsichtlich der Struktur und des Inhalts orientierten sich diese stark an den bereits etablierten Vorschriften für die Eisenbahn.

Insbesondere die Regelwerke der Bayerischen sowie der Preußischen Staatseisenbahnen¹⁵⁸ enthielten bereits in ihren ersten Ausgaben Mitte der 1890er-Jahre konkrete Angaben zu Brückenlagern, die sich jedoch vornehmlich auf die konstruktive Ausbildung derselben bezogen. Nur vereinzelt gaben die Vorschriften der Ländereisenbahnen konkrete Berechnungshinweise, so dass die Dimensionierung der Lagerbauteile inklusive der Wälzkörper noch überwiegend dem Verfasser der Lagerstatik überlassen war.

Die Vorschriften der Staatseisenbahnen dienten als Vorlage für die länderübergreifenden Regelwerke der 1920 gegründeten Deutschen Reichsbahn. Die Erarbeitung dieser Vorschriften bot in den frühen 1920er-Jahren die Möglichkeit, die praktisch seit drei Jahrzehnten nicht veränderten Angaben der Ländereisenbahnen zu Brückenlagern dem aktuellen Stand der Technik anzupassen. Die 1922 als vorläufige Fassung erschienenen *Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken (BE)* der Deutschen Reichsbahn regelten erstmals auch die vollständige Bemessung der Brückenlager. Abgesehen von der wesentlichen Erhöhung der zulässigen Spannungen bis zur offiziellen Ausgabe der *BE* im

¹⁵⁸ Ab 1896 als Preußisch-Hessische Eisenbahngemeinschaft [524/S.179].

Jahre 1925 sollte auch die Verankerung der Brückenlager in den Vorschriften der Deutschen Reichsbahn bis zur Aufspaltung dieser in die DB (BRD) und DR (DDR) keine nennenswerte Änderung mehr erfahren. Insgesamt gesehen lassen sich im Untersuchungszeitraum im Hinblick auf die Regelung zur Planung von Brückenlagern drei markante Phasen ausmachen:

- Eine erste Phase gänzlich ohne bauaufsichtliche Verankerung.
- Eine zweite Phase ab Mitte der 1890er-Jahre, in der wesentliche Anforderungen an die konstruktive Gestaltung von Brückenlagern in den Vorschriften der Ländereisenbahnen von Bayern und Preußen festgeschrieben wurden. Diese regelten den Bau von Brückenlagern in dieser zweiten Phase auch damals schon selbst außerhalb ihrer Ländergrenzen.
- Die Jahre der Deutschen Reichsbahn repräsentierten die dritte Phase, in der Bau und Unterhaltung von Brückenlagern durch die nun für alle Länder geltenden Vorschriften dieser Institution bauaufsichtlich geregelt waren. Wenngleich viele der Angaben aus den Ländervorschriften für die Regelwerke der Deutschen Reichsbahn übernommen wurden, stand die dritte Phase für zwei wesentliche Neuerungen. Erst jetzt wurde die Bemessung aller Lagerteile geregelt. Des Weiteren unterschied sich die konstruktive Durchbildung der beweglichen Lager, denn waren diese noch in der zweiten Phase oft mit vier und mehr Walzen ausgestattet, so sollten fortan bewegliche Lager mit maximal zwei Wälzkörpern empfohlen werden.

An dem mit den Vorschriften der Reichsbahn erreichten Stand orientierten sich in der Zwischenkriegszeit auch die Bestrebungen zur Erarbeitung erster Normen explizit zur Regelung von Brückenlagern, die Ende 1933 aus noch ungeklärten Gründen abbrachen. In der DDR führten die von staatlicher Seite forcierten Standardisierungsbestrebungen bald nach dem Zweiten Weltkrieg zu einer Wiederaufnahme der Normierungsarbeiten. In deren Folge entstanden diverse Regelwerke, die neben den neu aufkommenden Verformungslagern auch die gusseisernen und stählernen Brückenlager erfassten. Als Ende der 1970er-Jahre in der Bundesrepublik die Arbeiten an einer Lagernorm wieder aufgenommen wurden, spielten dort die inzwischen historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager zumindest für Neubauten keine Rolle mehr und wurden im Zuge der Normierungsarbeiten nicht mehr im Detail erfasst.

5.4 Verwendetes Material

5.4.1 Begriffe und Bezeichnungen

Im 19. Jahrhundert führten insbesondere die enormen Fortschritte im Bereich der Metallurgie zu einer Aufweichung der gebräuchlichen bzw. zur Einführung neuer Bezeichnungen von Eisenerzeugnissen. Die daraus resultierende allgemeine und weit verbreitete Unschärfe bei der Bezeichnung der Eisen-Kohlenstofflegierungen ist bekannt. Wenngleich es bereits seit den 1870er-Jahren Bemühungen um eine eindeutige Klassifizierung von Eisen- und Stahlerzeugnissen gab¹⁵⁹, so hängt die Bezeichnung der im Bauwesen verwendeten – aus Eisen oder Stahl bestehenden – Materialien doch oft noch heute vom jeweiligen Zugang der Autoren ab und ist auch im internationalen Kontext von einer Eindeutigkeit weit entfernt.

Die Schwierigkeit einer präzisen Bezeichnung betraf auch die Lager, bei denen das verwendete Material nicht schlüssig und teilweise widersprüchlich benannt wurde. Die Unstimmigkeiten betrafen vor allem die Verwendung der Begriffe **Gussstahl** und **Stahlguss** – eben jenes Material, das die Lager im Untersuchungszeitraum entscheidend prägte. Daher soll der Begriffsfindungsprozess hin zum heutigen Verständnis von **Stahlguss** durch nachfolgende zeitgenössische Zitate aus der Fachliteratur illustriert werden:

Tab. 18: Zeitgenössische Begriffsbeschreibungen zu Gussstahl bzw. Stahlguss

Jahr, Autor, Zitat	Quelle
1867, Keck: „Ueber das zu Brücken-Constructions zu verwendende Schmiedeeisen, Blech und Faconeisen: Gussstahl wird jetzt [...] wohl meist durch das Bessemer-Verfahren aus sehr reinem Roheisen hergestellt; im Bruche übertrifft er den Puddelstahl an Feinheit und Gleichmäßigkeit des Kornes [...]. Der Gussstahl wird bei seiner Herstellung in große gusseiserne Formen gegossen und dann unter schweren Hämmern ausgeschmiedet, damit er ein dichtes Gefüge erhält. Solche Gussstahlblöcke sind zur Herstellung der meisten Walzprodukte groß genug, so dass ein Zusammenschweißen aus mehreren Stücken nicht nöthig ist. Eine Paketbildung kommt also beim Gussstahl nicht vor.“	[176/S.373f]
1876, Klasen: „Der Gussstahl, als der beste und feinste aller Stahlsorten, wird durch Umschmelzen von Cement- oder Puddelstahl gewonnen. Dieses geschieht in Tiegeln aus dem besten feuerfesten Thon, [...]. Die Tiegel [...] werden mit Thondeckeln luftdicht verschlossen, und [...] in Tiegelöfen gestellt, wo die Stahlmasse durch natürlichen Luftzug bei Coaksfeuer in 3 bis 4 Stunden eingeschmolzen wird. Den geschmolzenen Stahl, welchen man zu Werkzeugstahl verwenden will, giesst man in zweitheilige gusseiserne Formen und schmiedet und walzt denselben nach Bedürfniss aus.“	[324/S.16]

¹⁵⁹ Siehe dazu [570], [567], [578], [577/S.37ff]; Über frühe Bemühungen zum internationalen Abgleich beim Gebrauch der Begrifflichkeiten siehe [519].

1881, Asthöwer:

[284/S.109f]

„Der Stahl-Faconguss beruht im Wesentlichen darauf, dass zu dem herzustellenden Faconstück eine Masseform gefertigt wird, die der hohen Temperatur, mit welcher der flüssige Stahl in dieselbe hineingegossen wird, Widerstand zu leisten im Stande ist [...]. Die bis jetzt zu derartigen Gussstücken gebräuchlichen Stahlorten variierten bezüglich ihrer absoluten Festigkeit zwischen 40 und 60 Kilo pro mm². Die Biegsamkeit und Dehnbarkeit [...] ist im kalten Zustande [...] nicht bedeutend. Dahingegen muss sich jedes Facongussstück [...] im warmen Zustande ebenso gut schmieden und verarbeiten lassen, wie der Coquillenblock, der aus demselben Stahl gegossen ist, und es muss sich durch ein derartiges Bearbeiten eine entsprechende Dehnbarkeit ergeben [...].“

1887, Mehrtens:

[201/S.6]

„Grosse Stahl-Schmiedestücke oder stählerne Achsen, sowie andere Gebrauchsstücke grösserer Art usw. werden [...] durch unmittelbaren Guss des Flusstahls in entsprechenden Massenformen [...] hergestellt. Der Erzeugung von eigentlichem Gussstahl (aus Schweisstahl oder Flusstahl) für feinere Formstücke (auch für Werkzeugstahl) geht stets noch eine Verbesserung durch Umschmelzen sorgfältig ausgewählter Stahlstücke in feuerbeständigen Tiegeln voraus. Den auf letztere Weise durch Gießen aus Tiegeln in feuerfesten Masseformen dargestellten Gussstahl, mit welchem Namen vielfach fälschlich auch der Flusstahl belegt wird, nennt man zur Unterscheidung von gewöhnlichem Stahl-Formguss (Stahl-Faconguss), welcher unmittelbar, ohne vorher gegangene Verfeinerungsarbeiten in Masseformen gegossen wird, Tiegel-Gussstahl.“

1889, Circularerlass für das im Eisenbahnbetriebe zur Verwendung kommende Eisen- und Stahl- [578/S.201] material des Königl. Preußischen Ministeriums für öffentliche Arbeiten:

„Es ist zu bezeichnen: Mit Gusseisen das in besondere Formen gegossene, in der Regel vorher in einem Cupol- oder Flammofen umgeschmolzene Roheisen. Werden dem Roheisen beim Umschmelzen Stahlabfälle zugesetzt, so nennt man das Erzeugnis Stahlguss [...]. Die Bezeichnung Gussstahl fällt aus.“

1889, Ledebur:

[328/S.333f]

„Lässt sich im Cupolofen Stahlguss erzeugen? Beitrag zur einheitlichen Benennung von Eisen und Stahl im Königl. Preußischen Eisenbahnbetrieb:

Das Verfahren, beim Cupolofenschmelzen Stahlabfälle zuzusetzen, um ein Gusseisen von vorzüglicher Beschaffenheit zu erhalten, ist schon ziemlich alt [...]. Als Stahlguss können doch, sowohl der wörtlichen Bedeutung als der üblichen Anwendung des Wortes zufolge, nur solche Gussstücke bezeichnet werden, welche aus Stahl gegossen worden sind. Man mag nun den Begriff des Wortes Stahl auslegen, wie man will, so wird doch darüber kein Zweifel obwalten, dass als Stahl nur ein Eisen bezeichnet werden kann, welches noch ohne Schwierigkeit schmiedbar ist, dessen Kohlenstoffgehalt also nicht erheblich über 2% hinausgeht. Solches Eisen aber lässt sich im Cupolofen nicht erzeugen [...]. Wirklicher Stahlguss wird bekanntlich durch Stahlschmelzen im Tiegel oder im Martinofen erzeugt und besitzt einen höheren Werth als die aus dem Cupolofen oder gewöhnlichen Gießereiflammofen gegossenen Waaren, auch wenn das Schmelzen im letzteren Falle mit Zusatz von Stahl geschah.“

1893, Mehrtens:

[203/S.582]

„Gußstahl wird zwar auch vielfach als Flußstahl bezeichnet. Das ist aber nicht zutreffend. Nach den heutigen Anschauungen begreift man unter dem Sammelnamen Flußeisen oder Flußstahl in der Regel nur die bei einmaliger Schmelzung unmittelbar aus den Rohstoffen erzeugten Eisensorten. Dazu gehört der Gußstahl nicht, da er ja erst durch mehrmalige Schmelzung aus den Flußmetallen erhalten wird.“

1901, Ledebur:

[330/S.3f]

„Das Stahlschmelzen erfand man gegen Ende des vorigen Jahrhunderts, und man nannte den im geschmolzenen Zustande gewonnenen Stahl Gussstahl. In neuerer Zeit, nachdem mehrere Verfahren zur Darstellung flüssigen Stahls erfunden worden waren, wurde jene Benennung durch den allgemeinen Ausdruck Flusstahl ersetzt, ohne jedoch bis jetzt ganz aus dem Sprachgebrauche verschwunden zu sein. Da man Stahl anfänglich nur in Tiegeln schmolz, beschränken manche auch jetzt noch die Benennung Gussstahl auf den in Tiegeln geschmolzenen Stahl (den Tiegelstahl), obwohl der Bedeutung des Ausdrucks gemäss seiner Anwendung auf die Bezeichnung allen im geschmolzenen Zustande gewonnenen Stahls nichts entgegensteht. Viele Jahrzehnte

hindurch aber goss man aus dem geschmolzenen Stahle nur Blöcke, welche zum Ausschmieden bestimmt waren, und aus welchen Werkzeugstahl, [...] auch Geschütze durch Schmieden und fernere Bearbeitung gefertigt wurden. Während demnach das Wort Gusseisen sich nur auf gegossene Gebrauchsgegenstände bezieht, bezeichnen die Ausdrücke Gussstahl und Flussstahl nur die Stahlgattung (als Gegensatz zum Schweisstahl, welcher im nichtflüssigen Zustande erfolgt) ohne Rücksicht auf die Art und Weise der stattgehabten Verarbeitung.

Erst [...] 1851 brachte die Bochumer Gussstahlfabrik gegossene und nicht durch Schmieden weiter verarbeitete Stahlwaren in den Handel [...]. Man nennt die aus Stahl gegossenen Gebrauchsgegenstände Stahlguss oder, zur besseren Unterscheidung von jenen für die Weiterverarbeitung bestimmten Stahlblöcken, Stahlformguss, und man pflegt diese Ausdrücke auf alle aus schmiedbarem Eisen erzeugten Gusswaren auszudehnen, selbst wenn das Material seiner chemischen Zusammensetzung und seinem Verhalten nach nicht eigentlich als Stahl im engeren Sinne gelten sollte.

Ganz streng lässt sich in jetziger Zeit der Unterschied zwischen Eisen- und Stahlguss nicht immer feststellen. Selbst wenn man das Wort Eisenguss seiner besprochenen älteren Auslegung gemäss nur auf die aus Roheisen, d.h. nicht schmiedbarem Eisen, gefertigten Gusswaren beschränken, das Wort Stahlguss dagegen auf alle aus schmiedbarem Eisen gegossenen Gegenstände ausdehnen will, treten uns doch bisweilen Übergangsformen zwischen den beiden Eisengattungen (Roheisen und Stahl) entgegen; mitunter auch mischt man zur Erzielung gewisser Erfolge Roheisen und Stahl miteinander, und da der Laie gewohnt ist, mit dem Ausdrucke Stahl den Begriff einer besonders vorzüglichen Eisenart zu verbinden, liegt die Versuchung nahe, in solchen Fällen das Erzeugnis als Stahlguss zu bezeichnen, auch wenn es [...] den Namen nicht verdient.“

1922, Schaper:

[240/S.60]

„Bisher wurde in Deutschland der Flussstahl im Brückenbau hauptsächlich in zwei Formen verwendet: erstens als Stahlguß, auch Stahlformguß genannt, das ist der in Formen gegossene und nicht weiter bearbeitete Flussstahl, und als Schmiedstahl, das ist der gegossene und durch Hämmern oder Pressen weiter bearbeitete Stahlguß.“

1924, DIN 1505 „Stahlformguß (Stahlguß)“

[412/S.20].

„Stahlformguß oder Stahlguß wird aus Stahl im Tiegel-, Martin-, Elektroofen oder in der Birne hergestellt und ist ohne weitere Behandlung schmiedbar. Gußstücke, die durch nachherige Behandlung im Temperofen stahlähnliche Eigenschaften erlangen sollen (Temperguß), sind nicht als Stahlformguß (Stahlguß) zu bezeichnen“

1955, Gramm:

[513/S.59]

„Stahlguß ist Stahl, der im Martin-, Tiegel-, Elektroofen oder in der Birne erzeugt und in Formen vergossen wurde. Er ist ohne weitere Behandlung schmiedbar. Als Gussstahl bezeichnete man früher den in Blockformen vergossenen, besonders sorgfältig erschmolzenen Tiegelstahl, der durch Schmieden oder Walzen weiterverarbeitet wurde. Diese Bezeichnung ist nicht mehr üblich.“

Bei all den begrifflichen Unschärfen verdeutlichen die Zitate zwei grundsätzliche Probleme. Ein erstes betraf die Abgrenzung der Begriffe Gussstahl und Stahlguss untereinander. Hier sollte sich erst im 20. Jahrhundert der Begriff Stahlguss durchsetzen, während noch im 19. Jahrhundert parallel auch die Bezeichnung Gussstahl für vergossenen Stahl üblich war. Beim Studium der historischen Literatur ließ sich eine Abgrenzung im Gebrauch beider Begriffe – obgleich nicht immer schlüssig – mit folgender Tendenz ausmachen: Der Begriff Gussstahl bezog sich vornehmlich auf das P r o d u k t , der Begriff Stahlguss (Stahlformguss)

hingegen auf den Prozess¹⁶⁰. Dass der Begriff Gussstahl letztlich zugunsten von Stahlguss aufgegeben wurde, lag sicherlich auch an der von MEHRTENS 1887 und von LEDEBUR 1901 beschriebenen begrifflichen Überschneidung mit Flusstahl. Wenngleich historisch gewachsen, erscheint diese Entwicklung aus heutiger Sicht etwas unglücklich, stehen doch so aktuell die Begriffe Gusseisen – Stahlguss anstatt Gusseisen – Gussstahl einander gegenüber. Letzteres würde aus Sicht des Verfassers die in Fußnote 160 erläuterten Parallelen allein vom Sprachgebrauch her besser vermitteln.

Ein zweites Problem betraf die Bezugnahme auf die Qualität. Hier verdeutlichen die genannten Beispiele, dass auf Grund unterschiedlicher Interpretationen auch durch z.B. Stahlabfälle aufgebessertes Gusseisen als Stahlguss bzw. Gussstahl bezeichnet wurde. Überraschend ist hierbei, dass diese auch aus zeitgenössischer Sicht fachlich nicht korrekte Interpretation 1889 ihren Weg bis in die Gesetzgebung fand.

Insgesamt veranschaulichten die Zitate die Unzulänglichkeiten beim Gebrauch der Begriffe, die beim Studium und bei der Auswertung der Literatur zu erwarten waren. Allein der Begriff Gussstahl konnte sich theoretisch auf drei ganz unterschiedliche Materialien beziehen – auf Flusstahl, auf besseres Gusseisen und auf Stahl(form)guss. Stahlguss wiederum konnte für vergossenen Stahl als auch – in Preußen seit 1889 sogar durch Gesetzeserlass legitimiert – für besseres Gusseisen gebraucht werden. Mit dem beginnenden 20. Jahrhundert entwickelte sich die Verwendung der Begriffe zunehmend hin zum aktuellen Verständnis.

Die genannten begrifflichen Schwierigkeiten erschwerten die Auswertung der Literatur bezüglich der für Brückenlager verwendeten Materialien. Primärliteratur, z.B. die zeitgenössische Beschreibung eines Brückenbauwerks durch den Ingenieur, war hierbei wenig hilfreich, blieb doch das Verständnis des jeweiligen Autors von den Materialbezeichnungen in der Regel unvermittelt. Die nachfolgende Darlegung der werkstofflichen Entwicklung der Brückenlagerherstellung vertraute deswegen vornehmlich auf Sekundärliteratur, wie Fachbücher und Zeitschriftenartikel, die rückblickend den Gang der Dinge auswerteten und beschrieben.

¹⁶⁰ Hier fallen Parallelen zum Gebrauch der Begriffe „Eisenguss/Stahlguss“ und „Gusseisen/Gussstahl“ in der historischen Literatur auf. Die Begriffe „Eisengießerei“ und „Stahlgießerei“ beziehen sich jeweils auf den Prozess der Herstellung, ebenso das Zitat „Denn der Stahlguss ist immerhin erheblich kostspieliger als der Eisenguss“ [537/S.434]. Andererseits wird der Begriff „Gußstahl“ oft verwendet, sobald es sich auf ein aus gegossenem Stahl hergestelltes Produkt bezieht, z.B.: „Der Hauptanziehungspunkt ist ein reiner Gußstahlblock von 2150 kg Gewicht. [...] Krupp zeigt gleichzeitig die Verwendbarkeit des Gußstahles an einigen [...] Walzen, an Federn und Achsen [...]“ [553/S.559]. Noch heute wird der Begriff Gusseisen (nicht Eisenguss) für Produkte aus gegossenem Eisen verwendet. Eine weitere Parallele zum Gusseisen ist auffällig: Interessanterweise gab es auch beim Stahlguss eine erste und gegebenenfalls eine zweite Schmelzung – siehe Zitat von MEHRTENS.

5.4.2 Material

- Kipp- und Lagerplatten

Bis in die 1870er-Jahre hinein blieb Gusseisen das vorherrschende Material für die Kipp- und Lagerplatten der gusseisernen und stählernen Brückenlager. Bei größeren Bauwerken jedoch begann Stahlformguss zunehmend, dem Gusseisen „[...] seine letzte Domaine im Brückenbau streitig zu machen“ [200/S.212]. Um 1880 galt Stahlformguss als vorzüglicher, allerdings teurer Ersatz für das Gusseisen [200/S.212]. Die stärkste Entwicklung erfuhr er in den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts [537/S.434]. Nach der Jahrhundertwende bestanden nur noch Lager kleinerer Bauwerken ausschließlich aus Gusseisen [186/S.126], letzteres hatte „[...] etwa dieselben Festigkeitseigenschaften wie das früher hergestellte“ [464/S.115]. Die Tatsache allerdings, dass um 1900 der Preis für Stahlguss ungefähr doppelt so hoch wie für Gusseisen und die Beschaffung mit längeren Lieferzeiten verknüpft war [288/S.49], führte teilweise zu gezielter Abstufung bei der Wahl des Materials, wie zum Beispiel an der zwischen 1907-1911 errichteten Hohenzollernbrücke in Köln (Abb. 74).

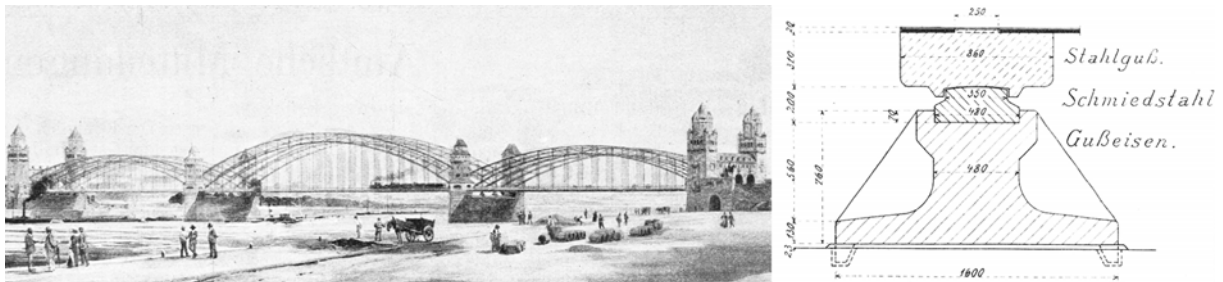


Abb. 74: Hohenzollernbrücke (Nordbrücke) Köln; Links: Bauzeitliche Ansicht [121], Rechts: Lagerdetail [237]

Bei den in den 1920er-Jahren einsetzenden Normierungsversuchen für Brückenlager wurde für die Lagerteile durchweg nur noch Stahlguss vorgesehen, da sich bei Verwendung von Gusseisen keinerlei wirtschaftliche Vorteile mehr ergaben [458/S.357]. Demgegenüber bot Stahlguss konstruktive Vorteile für den Abtrag horizontal wirkender Kräfte, da im Vergleich zu Gusseisen die Aufbauhöhe des Brückenlagers verringert werden konnte. Waren dennoch sehr große Lagerkörper erforderlich, wurden diese aus Einzelteilen wahlweise zusammengenietet oder -geschraubt bzw. aus mehreren Stahlgussstücken zusammengesetzt (Abb. 75). Für niedrig beanspruchte Bauteile bot Gusseisen eine preiswerte Option, z.B. für die zwischen Lagerkörper und Unterbau vermittelnden Auflagerplatten [245/S.167].

Ungeachtet der Entwicklung von Brückenlagern aus hochfesten Werkstoffen, z.B. aus Edelstahl, kamen Lager aus Stahlguss auch nach dem Zweiten Weltkrieg weiterhin für Brückenneubauten zur Anwendung. Erst mit der Etablierung der Verformungslager verlor Stahlguss sukzessive seine Bedeutung als vorherrschender Lagerwerkstoff.

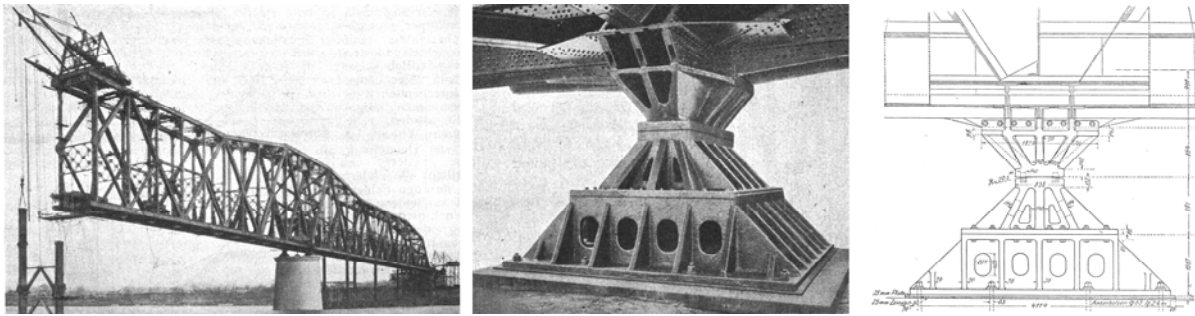


Abb. 75: Sciotoville-Brücke, USA, 1916; Links: Montage [216], Mitte/Rechts: Ansicht [216] und Zeichnung [206] des Mittellagers

- Wälzkörper

Während also im Untersuchungszeitraum und darüber hinaus vergossenes Eisen – später vergossener Stahl – als Ausgangsmaterial für die kompakten Lagerkörper dominierte, fand für die Rollen und Stelzen beweglicher Lager frühzeitig auch schon geschmiedeter Stahl Anwendung. WINKLER fasste den Stand der Technik um 1875 zusammen und ging dabei auf Details ein:

„Zuweilen ist früher Schmiedeeisen zu den Walzen angewendet worden. Jetzt wendet man meist Gusseisen an, was im vorliegenden Falle trotz seiner Sprödigkeit eine vorteilhafte Verwendung findet. Der sogenannte Schalenguss dürfte sich seiner Härte wegen wohl am besten eignen. Die Walzen werden in diesem Falle am besten hohl gegossen [...] Häufig findet aber auch Stahl Anwendung; derselbe eignet sich hierzu einestheils seiner größeren Festigkeit, wodurch weniger Walzen, also auch unter Umständen ein kürzeres Lager und kürzere Träger nöthig werden, andertheils aber auch der etwas geringeren wälzenden Reibung wegen“ [108/S.272].

Diese Situation wurde von GABRIELY um 1879 prinzipiell bestätigt – ungeachtet des begrifflichen Interpretationsspielraums:

„Die Walzen sind entweder, obschon jetzt seltener, aus Schmiedeeisen, aus Gusseisen oder vortheilhaft aus Schalenguss, Gussstahl (Bessemer). Man macht sie entweder cylindrisch (voll), [...] oder man giesst sie hohl oder man setzt schmiedeeiserne Zapfen ein [...]“ [150/S.29].

Die Wahl eines geeigneten Ausgangsmaterials blieb offenbar von vielen Faktoren abhängig, zum Beispiel vom Preis und der Verfügbarkeit, von der abzutragenden Auflast o.ä. Ein Blick auf Tab. 9 auf Seite 89 zeigt, dass bis zum Ende des Untersuchungszeitraums die genannten Materialien mit ihrer spezifischen Belastbarkeit zur Auswahl standen, wobei im frühen 20. Jahrhundert Wälzkörper und Kippzapfen – also „[...] diejenigen Teile, die einer weiteren Bearbeitung bedürfen und sehr hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind [...]“ vorzugsweise aus Schmiedestahl hergestellt wurden [240/S.709]. Für hohe Beanspruchungen bestand darüber hinaus die Möglichkeit, besonders harten Schmiedestahl für die Wälzkörper zu wählen, der vergleichsweise hohe Kontaktspannungen erlaubte.



Pos	Stk	Gegenstand	Länge	Gewicht	Material	Bemerkung
1	1	Oberteil		86,0	Stahlguss	Stg 52.015
2	1	Rolle 65 φ		12,3	St 35.61	
3	1	Sattelstück		116,0	Stg 52.015	
4	2	Flacheisen für Rollensatz	555	5,8	Flussstahl	
5	2	Abstandsboizen 20 φ	540	2,5	"	
6	3	Rollen 90 φ	430	68,0	St 35.61	
7	8	Mullern 3/4 "		0,5	Flussstahl	
8	6	Richtsboizen 20 φ	90	1,3	"	
9	1	Grundplatte		186,0	Stg 52.015	
				478,4		

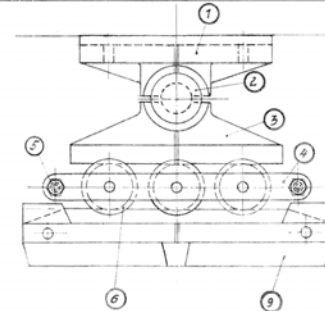


Abb. 76: Spreebrücke Cottbus-Kiekebusch; Oben: Links: Ansicht, Rechts: Bewegliches Lager [670]; Unten: Auszug aus der Ausführungszeichnung der Stahlgusslager inkl. Stückliste [643]

Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die Lagerwalzen größtenteils aus Stahlguss gefertigt [352/S.676]. Walzen aus hochwertigem Schmiedestahl bildeten jedoch noch immer eine Alternative, umgesetzt zum Beispiel bei der Spreebrücke in Cottbus, deren Überbau 1954 erneuert wurde. (Abb. 76) Der dort verwendete Vergütungsstahl C 35 war ein durch Härten mit nachfolgendem Anlassen vergüteter Stahl mit einer Mindeststreckgrenze von 42 kg/mm², einer Zugfestigkeit von 65 bis 80 kg/mm² und einer Mindestbruchdehnung von 16 % sowie einem Kohlenstoffgehalt von ca. 0,35 % [352/S.131].

5.4.3 Zusammenfassung

Die Generation der gusseisernen und stählernen Brückenlager wurde durch zwei Materialien geprägt – Gusseisen und Stahl, letzteres in gegossener oder geschmiedeter Form. (Abb. 77) Für die kompakten und mit differenzierter Geometrie herzustellenden Lagerplatten dominierte bis in das letzte Drittel des 19. Jahrhunderts hinein das Gusseisen, welches in der mittleren Periode des Untersuchungszeitraumes sukzessive durch Stahlguss verdrängt wurde, um schließlich gänzlich seine Bedeutung für die Herstellung von Brückenlagern zu verlieren.

Dieser Ablöseprozess ist auch bei dem für Wälzkörper verwendeten Material erkennbar. Hier jedoch ermöglichte die stabförmige und vergleichsweise schlanke Bauteilgeometrie darüber hinaus die Anwendung von geschmiedetem Stahl, welcher während des gesamten Untersuchungszeitraumes nie gänzlich seine Bedeutung als Ausgangsmaterial für die Walzen verlor.

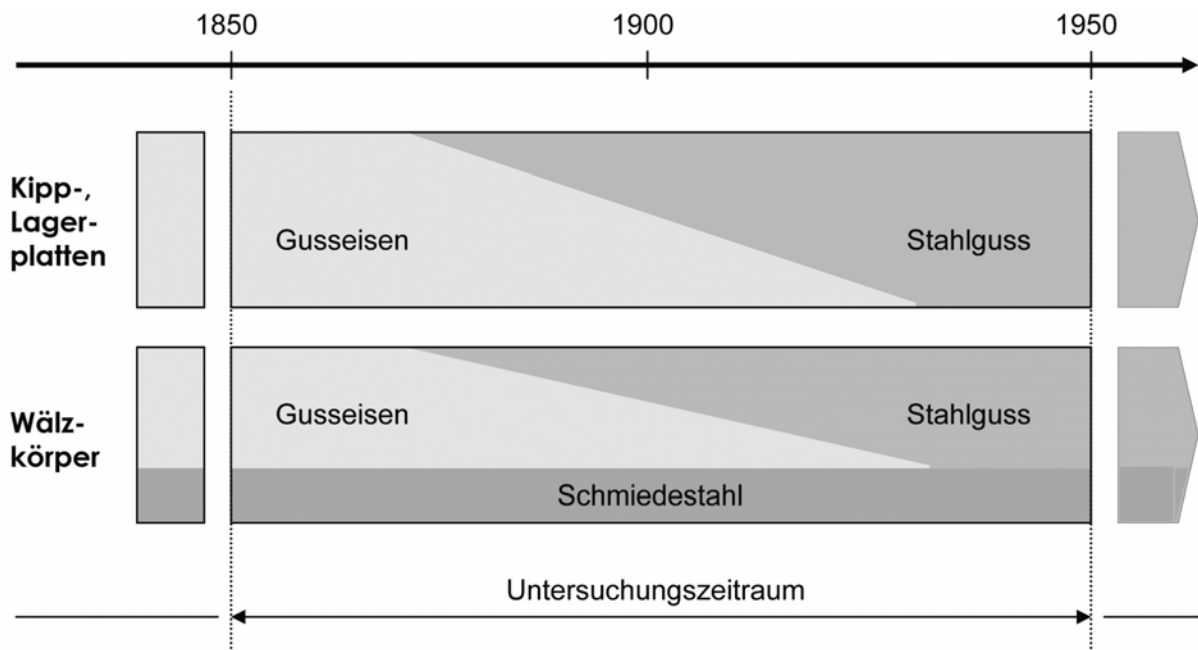


Abb. 77: Verwendete Materialien im Untersuchungszeitraum

5.5 Herstellung und Eigenschaften

Nachfolgend werden wesentliche Aspekte zur Herstellung von Brückenlagern erläutert, wobei zwischen fertigungstechnischen Einflüssen und solchen materialtechnischer Natur unterschieden wird. Letzterer Punkt stützte sich im Wesentlichen auf Quellen, die sich mit der Herstellung von Gießereiprodukten bzw. von Brückenbauwerken allgemein befassten. Die zunächst jedoch erläuterten fertigungstechnischen Einflüsse geben zu ausgewählten Lagerarten einen über den Untersuchungszeitraum verteilten Überblick zum Kontext der Lagerherstellung. Hierfür konnten einige wertvolle Quellen ausgewertet werden.

5.5.1 Fertigungstechnische Einflüsse

- Flächenlager

In einem um 1860 veröffentlichten Manuskript zum Bau der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn (1856-57) – also zu Beginn des Untersuchungszeitraums – fanden sich unter anderem detaillierte Beschreibungen der Brückenlager. Nachfolgendes Zitat bezieht sich auf die Brücke über die Drage, welche mit Gitterträgern zwei Öffnungen von 55 Fuß (ca. 17 m) überspannte (Abb. 78):

„Das Auflager der Brücke ist zweierlei Art, die eine Seite und zwar auf dem Mittelpfeiler, ist unverrückbar fest, das andere ist beweglich. Das feste Auflager besteht aus einer 2 zölligen mit Rändern und mit einer quer gegen die Richtung der Brücke laufenden Rippe versehenen gußeisernen Platte. Ihre Oberfläche ist in einem Bogen von $\frac{5}{16}$ “ Pfeilhöhe gewölbt.

Unter den Trägern liegen je 2 schmiedeeiserne Platten von 1" Stärke und 9" Breite, welche mit denselben durch Nieten mit versenkten Köpfen verbunden sind und zwischen sich einen Raum für die Querrippe lassen. Die Gußplatte ist mit dem Meißel und der Feile möglichst genau abzurichten, sie liegt in dem Hausteine durch eine angegossene Nase fest.

Das bewegliche Auflager besteht aus einem gußeisernen Kasten von 2" Wandstärke, derselbe ist von Innen und an der oberen Seite genau auf der Hobelmaschine abzurichten. Er enthält ein System von 9 Stück gußeisernen Walzen von 4" Durchmesser, welche auf der Drehbank auf das genaueste von gleicher Stärke abgedreht und poliert sein müssen. Die Walzen haben angedrehte Zapfen und sind durch einen schmiedeeisernen Ring in gehöriger Entfernung gehalten.

Die seitliche Führung erhält der Träger durch gußeiserne Leisten, welche gehobelt sind und Federn tragen, welche in gehobelte Nuthen des gußeisernen Kastens, mit dem sie verschraubt sind, passen.

Auf den Walzen ruht der Träger durch eine zöllige schmiedeeiserne Platte, 3' 3" lang 9" breit, welche unten und an den Seiten gehobelt ist; dieselbe läßt durch ein System von Zug- und Druckschrauben ein genaues Ausrichten der Träger zu. Nach vollendeter Aufstellung desselben ist der Raum zwischen Platte und Träger mit Eisenkitt vollgeschlagen worden" [181/S.18f].

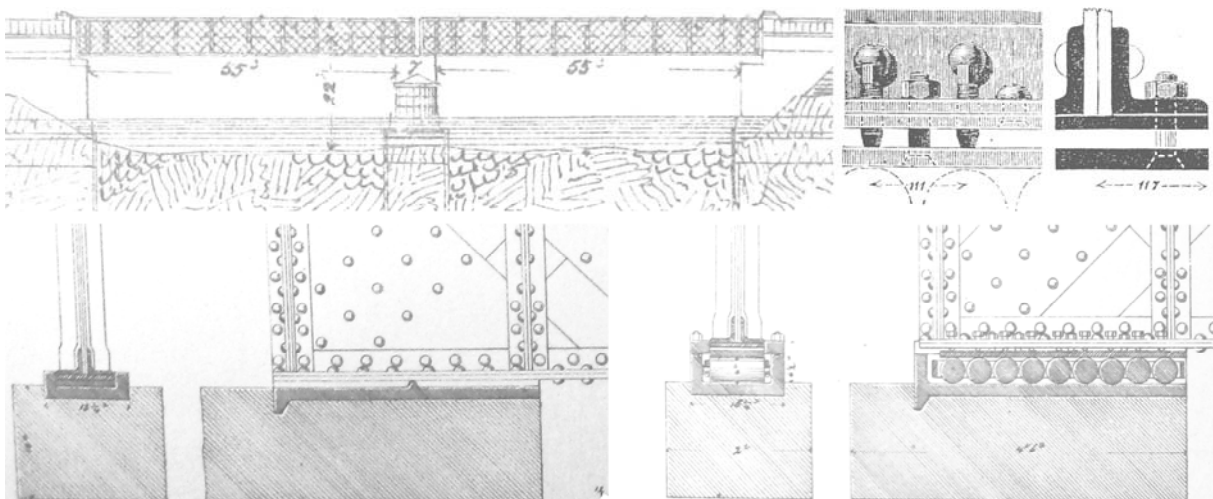


Abb. 78: Dragebrücke; Oben: Links: Ansicht [181], Rechts: Detail zur Lagerjustierung mittels Schrauben [108]; Unten: Links: Festes Auflager, Rechts: Bewegliches Auflager [181]

Die Notizen zu den Brückenlagern der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn sind in vielerlei Hinsicht interessant. Zum einen vermitteln sie einen Eindruck über den bestehenden Qualitätsanspruch bei der Fertigung der Lagerteile. Zum anderen verdeutlichen die Ausführungen den aufkeimenden Widerspruch zwischen theoretischem Modell und praktischer Ausführung auf Grund der konstruktiven Unzulänglichkeiten der Flächenlager. Bei der statischen Berechnung wurde in Abgrenzung von der lichten Weite bereits eine „freitragende“ Länge unter Einbeziehung der jeweils halben Auflagerlänge angesetzt [181/S.21]. Die praktische Umsetzung dieses Modells reduzierte sich offenbar jedoch auf die festen Auflager, wo eine gewölbte Grundplatte die weitgehende Fixierung des Auflagerpunktes ermöglichte und darüber hinaus eine quer laufende Rippe diesen Punkt zusätzlich betonte. Damit handelte es sich beim

Festlager prinzipiell bereits um ein unverschiebliches Linien-Kipplager. Inwieweit auf der beweglichen Auflagerseite das System von Druck- und Zugschrauben für eine ähnliche Justierung des Auflagerpunktes genutzt wurde, blieb offen.

Der für die Führung der Träger gewählte gusseiserne Kasten war kaum üblich. Einerseits erschwerten die Seitenwände das Hobeln der Grundfläche sowie das Reinigen der Lauffläche [108/S.282], andererseits fehlte dem Lager damit insgesamt die erforderliche Belüftung, damit eingedrungene Feuchtigkeit zügig verdunsten kann.

Erwartungsgemäß fanden sich noch keine Hinweise für eine Dimensionierung der Lagerwalzen. Die statische Berechnung des eisernen Überbaus hingegen zeugte in Qualität und Quantität von dem schon bestehenden theoretischen Verständnis des Tragwerks.

Wenige Jahre später entstand die auch durch viele Publikationen bekannte Brücke über den Alten Rhein bei Griethausen (1863-65) mit einer Öffnung von 320 Fuß (ca. 97 m). Obschon stillgelegt, ist sie jedoch mitsamt ihren originalen Lagern erhalten geblieben. Diese wurden im *Technischen Erläuterungsbericht* zum „Entwurf der Eisenconstruction“ [642] von 1863 ausführlich beschrieben. Die vielen technischen Details zu den inzwischen selten gewordenen keiljustierten Flächenlagern lassen den sehr ausführlichen Abdruck der den Lagern gewidmeten Passage aus dem Bericht sowie die erweiterte bildliche Dokumentation in Abb. 79 hier sinnvoll erscheinen. Dies gilt umso mehr, da das bisher im Historischen Archiv der Stadt Köln gelagerte Original des Erläuterungsberichtes beim Einsturz des Gebäudes möglicherweise für immer verloren ging¹⁶¹.

„Die festen Auflager.

In jedem Auflager ist unter der ersten Horizontalen eine gußeiserne Platte von 5' 10" Länge, 2' 4" Breite und 3" Dicke geschraubt. Dieselbe hat auf ihrer oberen Fläche rinnenförmige Aussparungen für die Nietköpfe, auf der unteren breite Rippen, zwischen welchen die drei Tragkeile liegen. Diese sind von dichtem Schmiedeeisen herzustellen, erhalten eine Breite von 4" und bei einer Verjüngung von 1:56 eine mittlere Tiefe von 2".

Die Keile ruhen auf einer gußeisernen Platte von 6' 6" Länge, 2' 6" Breite und 2 ½" Dicke, welche unter den Keilen horizontal gehobelte Auflagerflächen hat. Auf die Enden dieser Platte sind schmiedeeiserne Winkel aufgeschraubt, welche in Einklinkungen der oberen Gußplatte eingreifen.

Die unteren Gußplatten sind vollkommen horizontal und in gleicher Höhe in Cement zu verlegen und durch Dorne mit dem Mauerwerk der Pfeiler so zu verbinden, daß eine Verschiebung in horizontaler Richtung nicht eintreten kann.

¹⁶¹ Die Dokumente zur Brücke wurden dankenswerterweise von VOLKER MENDE M.A., zur Zeit der Bearbeitung Doktorand am Lehrstuhl Eisenbahn- und Straßenwesen der BTU Cottbus, bei einem Besuch im Archiv kopiert.

Die beweglichen Auflager.

Die unter den Horizontalen befestigten Gußplatten, so wie die Tragkeile haben in den beweglichen Auflagern genau dieselbe Form wie in den festen.

Die Keile liegen hier jedoch auf einer Gußstahlplatte von 6' 6" Länge, 2' 9" Breite und 1 ¾" Dicke, auf deren Enden die Winkel geschraubt sind, welche in die Einklinkungen der oberen Gußplatte eingreifen.

An der Gußstahlplatte ist die untere Fläche so wie die Lagerflächen der Keile vollkommen eben und glatt zu hobeln, außerdem sind an den Längenkanten der unteren Fläche 2 Falze von ½" Tiefe und 2 ½" Breite einzuhobeln, in welche schmiedeeiserne Führungsleisten geschraubt werden.

Die Rollen sind von dichtestem Gußeisen herzustellen. Dieselben haben 9" äußeren und 6" inneren Durchmesser und müssen vollkommen zylindrisch abgedreht oder gehobelt sein; in die Enden sind 3" dicke [?]¹⁶² mit schmiedeeisernen Zapfen zentrisch einzutreiben.

Die Zapfen gehen durch einen schmiedeeisernen Rahmen, welcher die Rollen vollkommen parallel unter- und in gleichen Entfernungen voneinander hält. Der Rahmen ist aus 4 Theilen Flacheisen von 3 ½" Breite und 1 ¼" Dicke zusammengesetzt. Diese Theile sind an den Enden miteinander verschraubt, außerdem sind die zur Seite liegenden Rahmenstücke noch durch 2 Stehbolzen gehalten.

Die Rollen liegen auf einer Gußplatte von 6' 6" Länge, 2' 9" Breite, 2 ½" Dicke, deren obere Fläche ebenfalls vollkommen eben und glatt gehobelt ist. Auf dieselbe sind an den Längsseiten in gehobelten Falzen ebenfalls 2 Führungsleisten geschraubt. Diese Platte wird in Cement verlegt, so daß die obere Fläche genau horizontal ist und mit der benachbarten in einer Ebene liegt, außerdem ist die Platte mit dem Mauerwerk der Pfeiler so zu verbinden, daß keine Verschiebung vorkommen kann.

Beim Aufstellen der beweglichen Auflager ist darauf zu achten, daß bei mittlerer Temperatur von +10° [?]¹⁶² die Kanten der Gußstahlplatten genau senkrecht über denen der unteren Gußplatten und daß die Mitten der Tragkeile genau senkrecht über den Mitten zwischen zwei Rollen liegen.

Sämtliche Tragkeile müssen so angezogen werden, daß bei der maximal. Belastung der Eisenconstruction der Druck auf allen gleich ist, bei unbelasteter Construction der Druck von den inneren nach den äußeren gleichmäßig zunimmt" [642/S.48-1f].

Einige Jahre nach dem Bau der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn (KCFE) wurden für die Brücke bei Griethausen noch immer Flächenlager geplant. Im Detail unterschieden sich diese jedoch sehr deutlich von den zuvor beschriebenen. Zum einen wurde der Führungskasten zugunsten einer ebenen Grundplatte aufgegeben, welche neben der Inspektion der Wälzkörpereinheit auch ihre gute Belüftung erlaubte. Diese Anordnung hat sicherlich ganz wesentlich dazu beigetragen, dass die Lager erhalten geblieben sind. Die seitliche Führung der Walzen übernahm ein zusätzlicher Rahmen in Höhe der Walzenachse. Zum anderen erfolgte die Justierung der Lager mit Hilfe von Keilen. Vermutlich eignete sich die für die Brücken der

¹⁶² Wort nicht lesbar.

KCFE beschriebene Justierung mittels Schrauben nicht für die Lasten größerer Brücken. Zudem waren Schrauben teuer, mühsam zu regulieren, verstellten sich bei Erschütterungen und waren wegen ihres Ein- bzw. Verrostens nachträglich kaum verstellbar [108/S.304].



Abb. 79: Brücke über den Alten Rhein bei Griethausen; Oben: Links: Ansicht [670], Rechts: Bewegliches Lager - Schnitt [108]; Unten: Links: Auflagerpunkt des Überbaus am beweglichen Lager, Rechts: Blick auf die „Stirn“-Seite des Auflagerpunkts (oben) sowie Blick in den Walzensatz (unten); Aufnahmen 2009; [670]

Die am Ende des Erläuterungsberichtes beschriebene Justierung der Lager für verschiedene Lastfälle ist an der Keilstellung in der Lageransicht in Abb. 79 auch ablesbar. Es bleibt jedoch fraglich, inwieweit sich durch Einschlagen der Keile der resultierende Auflagerpunkt des Überbaus tatsächlich manipulieren ließ. Die Gussstahlplatte unterhalb der Keile erhielt nicht die an der oberen Gussplatte angebrachten „Nasen“ zur Führung der Keile, um der durch Erschütterungen und auf Biegung beanspruchten Platte keine Schwächung durch Einschnitte vorzugeben [108/S.305]. Dieses – nach heutigem Sprachgebrauch – ermüdungsgerecht konstruierte Detail war oberhalb der Keile in dieser Klarheit nicht erforderlich, da die Lage

der drei Überbau-Versteifungsposten am Brückenende direkt auf die Lager der Keile unterhalb abgestimmt war. Die Lage der Keile sowie deren Anzahl waren so gewählt, dass diese zur guten Lastverteilung möglichst mittig zwischen zwei Walzen lagen.

An der Griethausener Bücke schließlich finden sich die bereits im Abschnitt 5.4.2 vorgestellten hohl gegossenen Wälzkörper, obwohl das äußere Erscheinungsbild bei der Besichtigung der Lager dafür keinerlei Hinweise gab. Die hohlen Wälzkörper mit kräftiger Wandungsstärke wurden an den Stirnseiten praktisch „zugekorkt“ und dadurch versteift. Die damit einhergehende unterschiedliche Biegeweichheit entlang des Wälzkörpers wird dazu geführt haben, dass die versteiften Randbereiche einen Großteil der Auflast aufnahmen.

Auch im Fall der Griethausener Brücke fanden sich in der *Statischen Berechnung der Eisenconstruction* noch keine Hinweise auf eine Dimensionierung der Lagerwalzen [642/Statische Berechnung]. Wie der Abschnitt 6.1.1 zeigen wird, waren zur Zeit der Aufstellung der statischen Berechnung erste Dimensionierungsansätze bereits publiziert worden, die jedoch mit Kipplagern einen neuen Typus der gusseisernen und stählernen Brückenlagergeneration als Grundlage hatten. Die in Griethausen noch verwendeten Flächenlager waren in den 1860er-Jahren zum Auslaufmodell geworden.

- Kipplager

Die Ausbildung der Kippvorrichtung in der von WÖHLER vorgeschlagenen Art als Halbzapfen (vgl. Abb. 13, S.21) bewährte sich aus fertigungstechnischen Gesichtspunkten nicht. Zu groß waren die Schwierigkeiten, beide Lagerhälften passgenau nachzubearbeiten. Vor allem die im Bereich der Halbzapfen notwendigen Vorrichtungen zur seitlichen Führung der Lagerhälften erschwerten diesen Prozess – insbesondere bei Verwendung seitlicher Flansche (Abb. 80). Es bleibt fraglich, ob alternative Lösungen, wie zum Beispiel die ineinander verschränkten Halbzapfen der früheren Wilhelmsbrücke in Wrocław (Abb. 14 auf Seite 22), eine Bearbeitung der Zapfenflächen erleichterten.

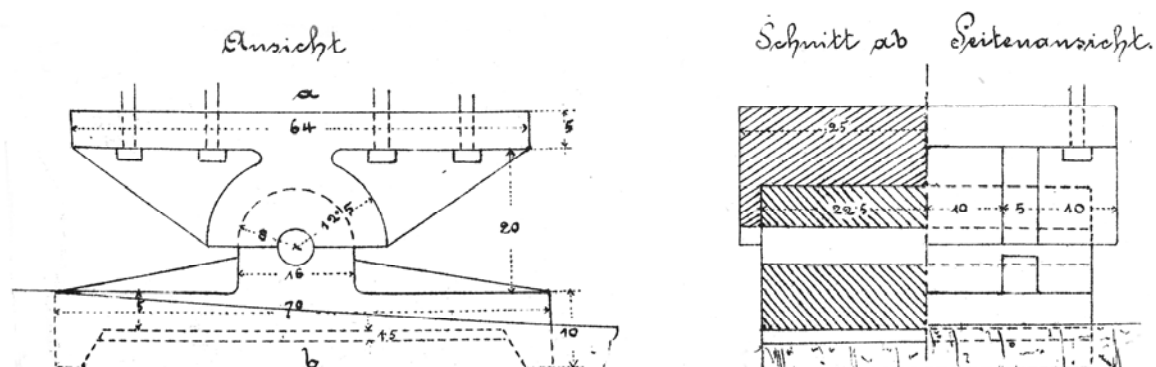


Abb. 80: Typisches, durch Flansche gegen Querverschiebung gesichertes Halbzapfen-Kipplager der K.k. Österreichischen Staatsbahnen [150]

Um die Herstellung der zahlreichen Lager für die 24 eisernen Bögen der Elbbrücke bei Dömitz (1870-73) – mit 1050 m seinerzeit die zweitlängste Strombrücke Deutschlands für die Eisenbahn [244/S.9] – zu erleichtern, erbat man im Namen der Firma Harkort 1872 um Änderung der ursprünglich geplanten Auflagerkonstruktionen. Ein entsprechender Brief an das Königliche Eisenbahn Kommissariat gibt ein anschauliches Beispiel, wie die Hersteller der Bauwerke eigene Impulse bei der Entwicklung der Lagertechnik setzten:

„Der Fabrikant Johann Caspar Harkort hat nun kürzlich beantragt, daß ihm gestattet werde, an der Konstruktion des Auflagers eine Änderung in der Weise vornehmen zu dürfen, daß die seitlichen Flanschen am unteren Theile des Scharniers fortgelassen werden, weil diese in hohem Grade die Bearbeitung der cylindrischen Flächen erschweren. Der Fabrikant will die durch jene Flanschen beabsichtigte sichere Führung des Scharniers gegen Seitenbewegungen dadurch erreichen, daß er ein schmiedeeisernes Keilstück in den unteren Theil des Scharniers einschreibt, dessen Lagerflächen durch Hobeln genau hergestellt werden sollen und welches an einer Verschiebung in seiner Längsrichtung durch einen eingesetzten cylindrischen Dübel verhindert werden soll. Die durch den Keil verminderte Größe der cylindrischen Berührungsfläche soll dadurch wieder ersetzt werden, daß diese Flächen um ein entsprechendes Maaß verlängert werden“ [217/S.2f] (Abb. 81).

Die genannten Schwierigkeiten bei der Fertigung qualitätsgerechter Halbzapfen-Kipplager dürften dazu geführt haben, dass sie ihre Bedeutung für Lagerkonstruktionen verloren. Wenngleich WINKLER 1875 die Vollzapfen- und die Halbzapfen-Kipplager weitgehend gleichberechtigt für Brückenbauten empfahl, so betonte er doch den großen Vorteil der vollen Zapfen, bei der Herstellung durch genaues Abdrehen und Einschleifen einen exakten Formschluss erzielen zu können [108/S.291f]. Folgerichtig wurde 1894 für den Bereich der Preußischen Staatsbahnen empfohlen, zweckmäßigerweise einen separaten Zylinderzapfen zwischen zwei hohlzylindrisch gegossenen und bearbeiteten Lagerstücken zu verwenden:

„Wenn diese Theile (mit entsprechender Sprengfuge) zunächst in einem Stück gegossen werden, so lässt sich das Loch für den Kippbolzen leicht sauber nachbohren; dieser selbst kann genau dazu passend abgedreht und nach Trennung der Lagerstücke eingefügt werden“ [362/S.496].

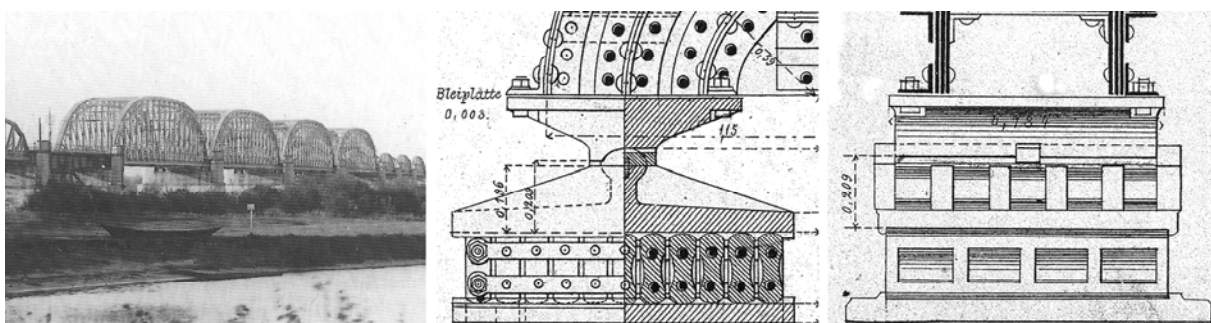


Abb. 81: Elbbrücke bei Dömitz; Links: Ansicht [244], Rechts: Detail des beweglichen Lagers [160]

- Einrollenlager

Der am Beispiel der Brücke bei Griethausen vorgestellte Guss hohler Wälzkörper blieb vorerst auf jene Jahre beschränkt, in denen durch konstruktive „Klimmzüge“ – wie zum Beispiel durch Verwendung von Keilen zur Höhenjustierung oder hohler Wälzkörper großen Durchmessers zur Lagerverkürzung¹⁶³ – versucht wurde, die inzwischen eigentlich schon technisch überholten Flächenlager am Markt zu halten. Mit der Einführung der Kipplager wurden solche Maßnahmen unnötig. Vollwalzen bzw. -stelzen dominierten fortan als Wälzkörper.

Die Etablierung der Einrollenlager im 20. Jahrhundert jedoch gab Gelegenheit, sich der Vorteile hohl gegossener Wälzkörper zu besinnen. Üblicherweise blieben Einrollenlager für Brücken kleiner bis mittlerer Spannweite vorbehalten, da der Guss hochwertiger Vollwalzen aus fertigungstechnischen Gründen nur bis ca. 20 cm Durchmesser beherrschbar war. So hergestellte Einrollenlager schieden für den Abtrag großer Auflagerkräfte praktisch aus.

Abb. 82 zeigt am Beispiel der Laeken-Brücke in Brüssel die Anpassung des Einrollenlagers auch für hoch belastete Lager. Geeignete Aussparungen innerhalb des Wälzkörpers ermöglichten eine Optimierung der Wandungsstärke für eine weitgehend gleichmäßige Abkühlung und somit den Guss der großen Einheit. Das aufwendige „Korsett“ vereinfachte die Montage der Brücke [653]. Ein stärker ausgebildeter mittlerer, zentraler Steg übernahm den Lastabtrag in „Normalposition“. Der Einsatz von Stahlguss¹⁶⁴ schließlich ermöglichte die vergleichsweise hohen Kontaktspannungen und die sichere Aufnahme der bei hohen Verschiebungswegen auftretenden Biege- und Zugspannungen.



Abb. 82: Pont de Laeken in Brüssel, 1942; Links: Ansicht, Mitte und Rechts: Lagerdetail [670]

¹⁶³ Das Bestreben der Konstrukteure, auch bei Flächenlagern die Anzahl der Walzen zu reduzieren [149/S.197], ergab vergleichsweise große Walzendurchmesser. Ohne nähere Begründung – offenbar aus fertigungstechnischen Gründen – empfahl FRÄNKEL, Walzen größer als 22 Zentimeter hohl zu gießen [149/S.197].

¹⁶⁴ Dem Verfasser lagen keine Planungsunterlagen vor, die Verwendung von Stahlguss für die Lager der Laeken-Brücke ist aber sehr wahrscheinlich.

5.5.2 Materialtechnische Einflüsse

Die Analyse im Abschnitt 5.4 zeigte, dass mit Gusseisen, Stahlguss sowie Schmiedestahl im Prinzip drei Werkstoffe als Ausgangsmaterial für Brückenlager verwendet wurden. Ihre materialtechnischen Einflüsse auf die Herstellung der Lager werden nun skizziert¹⁶⁵.

- Gusseisen

Bezug nehmend auf die im Abschnitt 5.4.2 genannten Zitate WINKLERS und GABRIELYS, begann seit Mitte der 1870er-Jahre der Schalenguss¹⁶⁶ eine interessante Alternative zu herkömmlichem Gusseisen oder Schmiedeeisen als Walzenmaterial zu bieten. Der Begriff „Schalenguss“ ist im Wesentlichen gleichbedeutend mit „Hartguss“¹⁶⁷, dessen Herstellung in Deutschland um 1830 gelang¹⁶⁸. In England, wo schon zur Jahrhundertmitte Hartguss für Walzwerke zum allgemeinen Stand der Technik zählte¹⁶⁹, nutzte man diesen praktisch von Anbeginn auch für die Wälzkörper beweglicher Brückenlager, zum Beispiel um 1850 für die Viña del Mar Bridge in Südamerika¹⁷⁰. Auch im deutschsprachigen Raum wurde der Hartguss für gusseiserne Brückenlagerwalzen angewendet, wie das Zitat WINKLERS belegt – hier nur als Schalenguss bezeichnet. Die Konstrukteure bedienten sich demnach innerhalb des Untersuchungszeitraums schon frühzeitig der Möglichkeit, durch Steuerung der Abkühlgeschwindigkeit das Endprodukt für die zu erwartenden hohen Kontaktspannungen zu veredeln – unabhängig von dem allgemein verbreiteten Vorgehen, im „zweiten Guss“ die Qualität des Ausgangsmaterials zielgerichtet zu steuern.

¹⁶⁵ Die prinzipielle Kenntnis der Herstellung und der wesentlichen Eigenschaften dieser drei Ausgangsmaterialien wird an dieser Stelle vorausgesetzt. In diesem Abschnitt sollen vielmehr die Besonderheiten der Herstellung von Brückenlagern und die daraus zu erwartenden spezifischen Eigenschaften erläutert werden.

¹⁶⁶ „Der Schalenguß dient zum Herstellen solcher Gußstücke, welche an einem Teil ihrer Oberfläche hart sein sollen. Man stellt den betreffenden Formteil aus Gußeisen [anstelle von Formsand; A.d.Verf.] her. An diesem schreckt infolge der schnellen Wärmeableitung das Eisen ab und es bildet sich eine Schicht harten weißen Eisens“ [540/S.99]. Im Prinzip ging es darum, „[...] Gußstücke künstlich rasch abzukühlen in der Absicht, sie ganz oder nur an gewissen Stellen hart zu machen“ [345/S.22]. „Da im Innern das Gußstück aus grauem Roh-eisen besteht, so wird es trotz seiner großen Härte dennoch nicht spröde und zerbrechlich sein“ [315/S.28].

¹⁶⁷ Während sich der Begriff „Schalenguss“ auf den Prozess bezieht, verweist „Hartguss“ auf das Produkt.

¹⁶⁸ Insbesondere für Hartgusswalzen für Walzwerke, denn die ursprünglich zum Auswalzen von Metallen verwendeten geschmiedeten Walzen waren für diesen Zweck zu weich [345/S.22].

¹⁶⁹ Die *Encyclopaedia Britannica* schreibt 1856: „Bar rollers are generally cast in chills, and great care is required to prevent the chill penetrating too deep so as to injure the tenacity of the metal and render it brittle“ [633/S.561]; hier eine zeitgenössische Erklärung der Formulierung „cast in chills“ im Zusammenhang mit der Herstellung von Walzen für Walzwerke: „[...] but as the pressure of the metal upon the rollers is very strong, it requires hard and close-grained cast iron to form good hard rollers. Those of this kind are cast in iron chills, so to cool their surfaces rapidly, which causes the iron to crystallize and be hardend“ [552/S.612].

¹⁷⁰ Im Zuge der Valparaiso and St. Jago Railway, ausgeführt von MESSERS. LLOYDS, FOSTERS, AND CO. Zu den Brückenlagern liest man 1857: „Over each pier [...], there are twenty-four friction rollers, [...] they were cast in chills, by which means uniformity of surface and great hardness of metal were attained“ [169/S.49].

- Stahlguss

Vergleichbare Entwicklungen erfuhr der Stahlguss im Untersuchungszeitraum. Nach MEHRTENS durfte noch 1882 für Brücken-Konstruktionsteile nur Tiegelgußs Stahl verwendet werden; die Qualität des aufkommenden Martingussstahls genügte noch nicht den Anforderungen im Brückenbau [200/S.213]. Nur eine Dekade später, 1891, hatte „[...] auch in Deutschland der Martinstahl vielfach den Tiegelstahl beim Formguss verdrängt“ [329/S.453]. Dieser Prozess zeigt sich deutlich am Beispiel der zweiten Dirschauer Weichselbrücke (1889-91), an der die hoch belasteten Teile, z.B. die Stelzen und Drehzapfen, aus „[...] Kruppschem Tiegelgußstahl und alle übrigen Hauptteile der Auflager aus Martingußstahl gefertigt wurden“ [157/S.334] (Abb. 83). Um bzw. nach der Jahrhundertwende kamen der Konverter und später der Lichtbogen- und Hochfrequenzofen für die Stahlgusserzeugung dazu¹⁷¹.

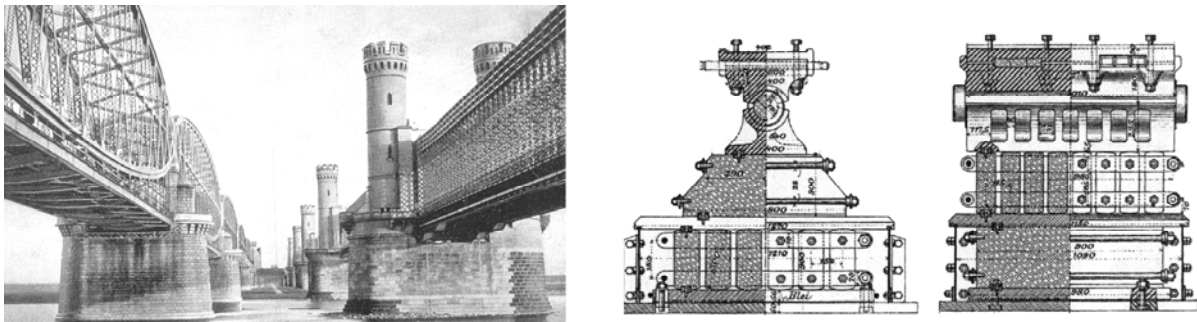


Abb. 83: Zweite Weichselbrücke Dirschau; Links: Ansicht der ersten und zweiten Weichselbrücke [224], Rechts: Zweiseitig bewegliche Stützenlager [282]

Die hauptsächlichsten Probleme beim Stahlguss entstanden aus der mit ca. 2200°C gegenüber Gusseisen doppelt so hohen Schmelztemperatur, dem vergleichsweise hohen Schwindmaß¹⁷² und der Bildung von Gasblasen sowie von Lunkern und Rissen¹⁷³ beim Erstarrungsprozess. Durch entsprechendes Formenmaterial, eine optimierte Formengeometrie, verlorene Köpfe und Windpfeifen sowie eine vorteilhafte Zusammensetzung der Schmelze versuchte man, diesen Problemen zu begegnen [329/S.452]. Stahlgussstücke aus den 1850er- und 1860er-Jahren waren noch mit Gasblasen durchsetzt, und ungeachtet metallurgischer Fortschritte wurde noch im 20. Jahrhundert das Problem der Lunker und Gasblasen

¹⁷¹ Die Schmelzverfahren mit ihren Vor- und Nachteilen werden in [297], [347] beschrieben.

¹⁷² Das Schwindmaß beträgt ca. 16 bis 18 mm/m [329/S.452]; „Diese große Contraction bildet die Ursache mancher Schwierigkeiten, denn die Form ist beinahe so starr wie gebrannter Thon, und doch verlangt der Stahl um so mehr ein nachgiebiges Material für die Schwindung, da bei der hohen Schmelztemperatur das Erstarren der mit der Form in Berührung kommenden Theile unmittelbar nach Beendigung des Gusses eintritt“ [342/S.144].

¹⁷³ Der technische Hintergrund der Blasen-, Lunker- und Rissbildung ist in [297/S.7f] erklärt.

in der Fachliteratur diskutiert¹⁷⁴. Untersuchungen an ausgetauschten Brückenlagern aus einem um 1910 gebauten Teilstück der Hochbahnlinie U2 in Berlin haben inzwischen gezeigt, dass diese Problematik auch die Lagerherstellung betraf (Abb. 84). Dabei versuchte man offenbar gar nicht erst, strukturelle Imperfektionen gänzlich zu vermeiden, sondern den Prozess des Gießens und Abkühlens so zu steuern, dass sich die unvermeidbaren Unstetigkeiten auf die Randbereiche beschränkten. So durften in der DDR noch in den 1980er-Jahren nach TGL-Vorschrift die weniger belasteten Bereiche von Stahlgussbrückenlagern bis zu 50% des Gesamtquerschnitts mit Lunkern o.ä. durchsetzt sein [369/P.3.7].

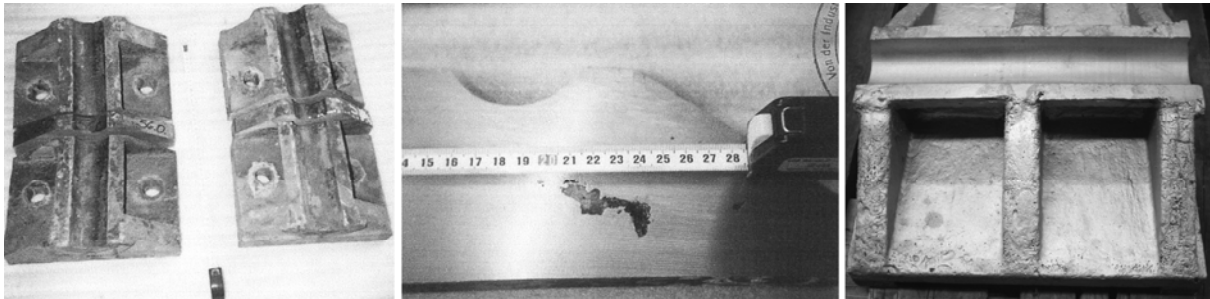
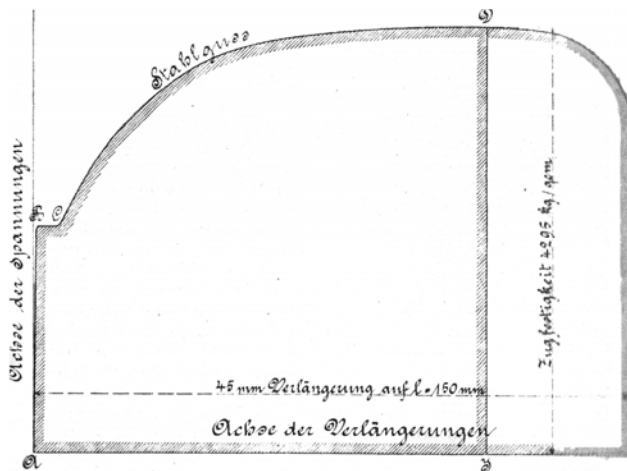


Abb. 84: Ausgetauschte Lager der Hochbahnlinie U2, Berlin; Links: Lagerplatten mit mittiger Probenentnahme, Mitte: Lunker in einer Lagerplatte; [645], Rechts: „Unreine“ Oberfläche einer Lagerplatte, sichtbar nach dem Sandstrahlen [689]

Stahlguss verdankt seine Etablierung als Konstruktionswerkstoff demnach weniger seinen Struktureigenschaften als seiner gegenüber Gusseisen bedeutend höheren Zugfestigkeit [330/S.400]. Um 1880 waren für Tiegelgussstahl Zugfestigkeiten von 40 bis 60 kg/mm², d.h. bis zu 600 N/mm², bei einer Dehnung von 2 bis 6% üblich¹⁷⁵. Duktilere Stahlgussqualitäten wurden erst mit der Einführung des Siemens-Martin-Ofens möglich. Das Materialverhalten von Siemens-Martin-Stahlguss im Zugversuch entsprach bald weitgehend dem von geschmiedetem Flussstahl. Neben einer typischen Arbeitslinie für einen Stahlguss um 1900 gibt Abb. 85 einen Vergleich der mit den drei um 1930 üblichen Schmelzverfahren erreichbaren Qualitäten für unlegierten Stahlguss, wobei für praxisübliche Konstruktionen die Werte ca. 10 % unter denen in der Tabelle lagen.

¹⁷⁴ Z.B. in [325].

¹⁷⁵ Siehe dazu in [200/S.213], [284/S.109]. Tiegelgussstahlprodukte mit dichtem Gefüge waren recht sicher herstellbar [332/S.532], doch noch wenig duktil. Der Kohlenstoffgehalt lag i.d.R. noch vergleichsweise hoch, da mit der Abnahme des C-Gehalts auch die Schmelztemperatur und damit die Schwierigkeit des Schmelzens im Tiegel stieg [330/S.404].



		Martin - Ofen	Kl. Bessemer Konverter	Elektro-Stahlöfen
C 0,15—0,2 %	Zugfestigkeit . . . kg/mm ²	40—45	38 - 45	43—50
	Dehnung % . . .	28—24	28—22	29—24
	Streckgrenze . . . kg/mm ²	22—24	20—24	25—30
	Qualitätskoeffizient	1,22—1,08	1,06—0,99	1,25—1,20
C 0,25—0,3 %	Zugfestigkeit . . . kg/mm ²	48—53	45—50	50—58
	Dehnung % . . .	23—18	22—18	24—20
	Streckgrenze . . . kg/mm ²	26—30	24—28	30—36
	Qualitätskoeffizient	1,10—0,95	0,99—0,90	1,20—1,16
C 0,5—0,55 %	Zugfestigkeit . . . kg/mm ²	70—75	60—70	70—80
	Dehnung % . . .	12—10	13—10	15—12
	Streckgrenze . . . kg/mm ²	30—40	30—38	35—40
	Qualitätskoeffizient	0,84—0,75	0,78—0,70	1,05—0,96

Abb. 85: Stahlguss im ausgehenden 19. Jahrhundert; Links: Spannungs-/Dehnungslinie von Siemens-Martin-Stahlguss, Ergänzend: die Streckgrenze betrug 2266 kg/cm² (227 N/mm²) [287], Rechts: Qualitätswerte von unlegiertem Siemens-Martin-, Konverter- und Elektro-Stahlguss [297]

Die Entwicklungen der Stahlgusstechnik im ersten Quartal des 20. Jahrhunderts wurden unter anderem durch die zunehmende Verwendung von Legierungselementen bestimmt [529/S.704]. Um 1940 ließen sich legierte Stahlgussprodukte herstellen, die den Eigenschaften geschmiedeter oder gewalzter Edelstähle ebenbürtig waren und dem Stahlguss neue Einsatzfelder ermöglichten [320/S.217]¹⁷⁶. Inwieweit legierter Stahlguss für Brückenlager eingesetzt wurde, blieb unklar. Trennt man sich jedoch von heutigen festen Kategorien und Definitionen für „legierten Stahlguss“¹⁷⁷ und versteht darunter vielmehr Maßnahmen, durch die Steuerung der chemischen Zusammensetzung die Eigenschaften des Endprodukts zu beeinflussen, so dürfte ab ca. Mitte der 1880er-Jahre kaum noch unlegierter Stahlguss für

¹⁷⁶ Bis in die 30er-Jahre des 20. Jahrhunderts hinein hielt sich allerdings bei den Stahlgießern die Auffassung, „[...] dass Stahlguß mit 50 bis 55 kg/mm² Zugfestigkeit jeden Wettbewerb mit geschmiedetem Stahl aushält, aber versagt, sobald die genannte Grenze überschritten ist, da Dehnung und Kerbschlagzähigkeit oberhalb einer Festigkeit von 60 bis 65 kg/mm² schnell sinken. Die Ursachen für die den gewalzten und geschmiedeten Edelstählen verhältnismäßig spät folgende Entwicklung des Stahlgusses möge darin zu suchen sein, dass einerseits ein gewisses Misstrauen der Konstrukteure gegen die Verwendung von Gußteilen bei hochbeanspruchten Maschinen und Apparaten bestand und zum anderen auch die Möglichkeiten der Herstellung von Abgüssen mit entsprechend verminderten Wandstärken, um beispielsweise den festigkeitserhöhenden Einfluß der Legierungszusätze auszunutzen, begrenzt waren“ [320/S.217].

¹⁷⁷ „Nach seiner Zusammensetzung wird der Stahlguß in unlegierten und legierten Stahlguß eingeteilt. Beide enthalten als bewusst zugesetzte notwendige Begleitelemente Kohlenstoff, Silizium und Mangan sowie als ungewollte schädliche Begleiter insbesondere Phosphor, Schwefel, Gase und nichtmetallische Einschlüsse verschiedener Art. Hochwertiger unlegierter Stahlguß soll möglichst nicht mehr als je 0,04%, legierter Stahlguß möglichst nicht mehr als je 0,03% Phosphor und Schwefel enthalten [...]. Legierter Stahlguß ist dadurch gekennzeichnet, dass seine [...] Eigenschaften außer durch den Kohlenstoff im wesentlichen noch durch eines oder mehrere der nachstehenden Elemente geregelt werden: Mangan >0,8%; Silizium >0,5%; Nickel, Chrom, Molybdän, Vanadium, Titan >0,1%; Kupfer und andere. Enthält Stahlguß nicht mehr als 5% an Legierungselementen, so gilt er als *niedriglegiert* und bei mehr als 5% *hochlegiert* [...]“ [335/S.12].

Brückenlager eingesetzt worden sein. Seit jener Zeit war der Einfluss der Elemente Kohlenstoff, Mangan und Silizium auf das Endprodukt weitgehend bekannt, hier insbesondere der von Silizium – später auch von Aluminium – auf einen blasenarmen Guss. Die grundsätzliche Fähigkeit und auch die Bereitschaft der Fabrikanten, bei der Herstellung von Stahlgussprodukten dessen Qualität steuern zu können, belegt ein Zitat von 1881:

„Es ist nun wohl allgemein bekannt, dass das Material zu einer Axe nicht dieselben Eigenschaften haben soll, als dasjenige zu einem Zahnrad, und dennoch werden zur Zeit noch diese, sowie eine ganze Reihe von Spezialitäten bestellt, ohne dass nähere Angaben zur Qualität gemacht werden, und es kommt vor, dass alle aus demselben Material hergestellt werden. Die Constructeure sollten daher ihre Anforderungen vorher genau bestimmen und auf die genaue Innehaltung, namentlich der chemischen Zusammensetzung, mehr Gewicht legen als auf ein glattes Aeusseres und absolute Blasenfreiheit [...]“ [342/S.144].

Nach der Jahrhundertwende wurden in Anlehnung an gewalzte und geschmiedete Edelstähle legierte Stahlgüsse mit Nickel-, Chrom-, Molybdän- und Vanadiumzusätzen entwickelt. Diese Legierungen fanden vorerst hauptsächlich im Maschinenbau ihren Einsatz, entsprechende Anwendungen im Brückenbau für die hier zu untersuchenden historischen Brückenlager sind unwahrscheinlich. SCHÖNHÖFERS Vielkugellager an der Hattenbachbrücke (1938) dürften wohl der erste Einsatz hochwertiger Sonderstähle im Brückenlagerbau sein, wo die Lagerplatten aus einem gehärteten Chromstahl bestanden [86/S.9]¹⁷⁸.

Ungeachtet des Einflusses verschiedener Zusätze beim Stahlschmelzen wussten die Konstrukteure frühzeitig schon um die Bedeutung einer nachträglichen Wärmebehandlung für die Eigenschaften des Stahls. Bereits 1882 betont MEHRTENS mit Bezug auf Stahlgussteile für Brückenkonstruktionen, dass „[...] das Ausglühen der Stücke, welches die Zähigkeit derselben erfahrungsgemäß bedeutend erhöht, weil dadurch die durch Schrumpfen entstandenen Spannungen ausgeglichen werden [...]“, stets vorgeschrieben werden sollte [200/S.213]. Bestand der Zweck dieses „Ausglühens“ zunächst im reinen Abbau der Eigenspannungen aus dem Abkühlvorgang im Sinne eines „Spannungsarmglühens“, so erkannte man schnell auch den positiven Einfluss dieser Wärmebehandlung auf die Festigkeitseigenschaften. Abb. 86 (linker Teil) wurde bereits 1881 im 1. Jahrgang der Zeitschrift *Eisen und Stahl* veröffentlicht, dem seinerzeit wohl bedeutendsten Forum für Eisenhüttenleute, und dürfte in Fachkreisen das Bewusstsein über die Zweckmäßigkeit des nachträglichen Glühens geschärft haben.

¹⁷⁸ Zu den Vielkugellagern und zu weiteren Anwendungen von legierten Stählen nach dem Untersuchungszeitraum vgl. Abschnitt 4.3.3.

Zwar wurde anfangs noch das richtige Vorgehen beim Glühen diskutiert¹⁷⁹, der Prozess selbst jedoch nicht mehr in Frage gestellt. Als Ingenieure sich im frühen 20. Jahrhundert im Kontext erster Normierungsversuche zum Lagermaterial äußerten, war das Glühen bereits selbstverständlicher Teil der Nachbehandlung von Stahlguss geworden:

„Bei diesem Baustoff [Stahlformguss, A.d.Verf.] werden auch innere Spannungen selbst bei Rippenkörpern durch das nachträgliche Glühen vollkommen ausgeschaltet, so daß er in jeder Beziehung eine große Sicherheit gewährleistet“ [457/S.357].

Parallel zum Glühen wurde in den 1880er-Jahren bereits das Härten der Stahlgussstücke in Öl diskutiert, um diesen größere Zähigkeit¹⁸⁰ zu verleihen [334/S.128]. Die beschleunigte Abkühlung führte jedoch wieder zu inneren Spannungen, und noch 1929 wird das Härten von Stahlguss nicht empfohlen [297/S.9]. Das Glühen war bei üblichen Stahlgussqualitäten zur Erzielung der beabsichtigten Eigenschaften völlig ausreichend. Erst für hoch legierte Stahlgüsse bestand nach der Wende zum 20. Jahrhundert die Notwendigkeit zur Vergütung, d.h. dem Härten folgte mit dem Anlassen ein erneutes Normal- bzw. Spannungsarmglühen, denn erst durch das Vergüten kam der Einfluss der Legierungselemente voll zur Wirkung [321/S.240]. Abb. 86 (rechter Teil) zeigt die Verbesserungen durch das Vergüten. Für die hier untersuchten gusseisernen und stählernen Brückenlager waren derartige Wärmebehandlungen nach Ansicht des Verfassers jedoch nicht üblich.

	Behandlung. Ng.: nicht gegläht. G.: gegläht.	Absolute Festigkeit	Ausdehnung.	Stahlsorte und Analyse		Streckgrenze kg/mm ²	Festigkeit kg/mm ²	Verhältnis Streckgrenze zu Zugfestigk. %	Dehnung (10- fache Maß- länge) %	Risikobehandlung %
		Kg pr. 9 mm.	Procent.							
1	Ng.	60	4	Fried. Krupp, A.-G., Essen, Sonder-Stahl- guß (0,20 % C)	unver- gütet	25,0	46,0	54	21,0	nicht ge- mes- sen
	G.	70,5	8							
2	Ng.	49	4,16	im Mittel aus drei Proben	vergütet	36,8	58,3	68	20,6	„
	G.	56,9	14,6							
3	Ng.	34	1	Bergische Stahl- industrie, Rem- scheid	unver- gütet	29,5	57,3	51	18,5	36
	G.	44	13							
4	Ng.	67,1	2	0,42 % C, 0,95 % Mn, 0,40 % Si, 0,030 % P	vergütet	40,2	61,0	66	18,5	37
	G.	66,5	12							
5	Ng.	54	1,65							
	G.	72,3	7,2							
6	Ng.	46,5	13,3							
	G.	47	27,5							

Abb. 86: Links: Gegenüberstellung der Festigkeitswerte von ungeglühtem und geglühtem Stahlguss [342], Rechts: Einfluss der Vergütung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahlguss [529]

¹⁷⁹ 1884 wurden in [334/S.128,131] verschiedene Anschauungen diskutiert, einerseits das allmählich und vorsichtige Abkühlen direkt nach dem Gießen, andererseits das nachträgliche Erwärmen und Glühen.

¹⁸⁰ Eine erhöhte Abkühlgeschwindigkeit führt zu einem feineren Gefüge, wodurch sich Zerreiß- und Schlagfestigkeit sowie die Streckgrenze erhöhen lassen [297/S.9].

- Schmiedestahl

Der eingangs erwähnte Schmiedestahl kam bei der Fertigung von Brückenlagern vornehmlich für die Wälzkörper beweglicher Lager zum Einsatz. Auch hier erschwerten begriffliche Unschärfen die Rekonstruktion der Entwicklung. Spricht WINKLER 1875 zum Beispiel allgemein von Schmiedeeisen als Grundmaterial für Walzen, so wird er damit konkret das damals noch übliche Schweißisen (bzw. Schweißstahl) gemeint haben. Beide Materialien – das eine weicher, das andere härter – konnten durch längeres Glühen, z.B. mit Holzkohle, zu einem Stahl größter Härte und hoher Elastizität „cementiert“ oder „hochgekohlt“ und damit äußerlich „verstählt“ werden¹⁸¹. Der damit verbundene Aufwand war sicherlich ausschlaggebend, dass der dann auch als Zementstahl bezeichnete Schmiedestahl mit der beginnenden Verwendung von Stahlguss für Lagerwalzen vorerst an Bedeutung verlor. Die Empfehlungen für die Dimensionierung der Walzen in Tab. 25 auf Seite 143 zeigen, dass Schmiedeeisen bzw. -stahl als Ausgangsmaterial erst wieder um 1900 an Bedeutung gewann. Dies lag sicher auch an den nun verbesserten Herstellungsmöglichkeiten. Ein Blick auf die in den Bemessungsvorschriften enthaltenen Angaben zu den HERTZ'schen Spannungen in Tab. 17 auf Seite 95 verdeutlicht, dass im frühen 20. Jahrhundert offenbar mit St 37 grundsätzlich auch ein normaler Flussstahl für die Walzen üblich war, die höheren Belastbarkeiten aber stets der hochgekohlte Schmiedestahl (Vergütungsstahl) ermöglichte.

5.5.3 Qualitätskontrolle

Erste verbindliche Vorschriften zur Sicherstellung einer Materialqualität erschienen erst im Zusammenhang mit den Vorschriften der Staatseisenbahnen aus den 1880er-Jahren. Im Umkehrschluss heißt das jedoch nicht, dass es vorher überhaupt keine Materialprüfung gab – erinnert sei nur an die um 1853 von WERDER für die Prüfung von Zugbolzen für Eisenbahnbrücken entworfene Zugmaschine [503/S.154].

Wie die Qualitätskontrolle bei den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern anfangs ausgeführt wurde, bleibt unklar, da Informationen aus neuerer oder zeitgenössischer

¹⁸¹ Siehe dazu in [346/S.664], [635/S.459]. Der Vorgang des Hochkohlens wird in [315/S.71f] wie folgt beschrieben: „Grosse Kästen von feuerfestem Material werden in abwechselnden Schichten mit Stabeisen und Cementpulver gefüllt und 5-10 Tage lang im Flammofen geglüht. Die anzuwendende Temperatur ist bis zur hellen Rothglut (1173°C) zu steigern [...]. Als Cementierpulver verwendet man grobgepulverte Holzkohlen, wobei man lieber Laubholzkohlen als Nadelholzkohlen wählt [...]. Die rohen Cementstäbe sind, wenn sie langsam im Ofen erkalten, nicht wesentlich härter als das ursprünglich angewendete Stabeisen, vom rothglühenden Zustande aber im Wasser schnell abgekühlt, erlangen sie Sprödigkeit und Härte, ihre Oberfläche aber ist rau geworden, und namentlich sind es Blasenbildungen, die dem rohen Cementstahl so charakteristisch sind, dass er davon den Namen „Blasenstahl“ erhalten hat.“

Literatur oder Archivmaterial dazu im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden konnten. Als sicher kann jedoch Folgendes angenommen werden:

Sowohl Besteller als auch Hersteller der Brückenlager hatten ein Interesse daran, dass die Lager hielten. Der Besteller war für die Tragfähigkeit der Brücke verantwortlich, und der Hersteller wollte seine Leistung bezahlt bekommen und konnte bei guter Qualität auf Nachfolgaufträge hoffen. Letztere hatten in den Gießereien ihre Erfahrungen und Methoden, über visuelle Kontrolle der Schmelze und des fertigen Produkts bzw. über entsprechende Klangproben – praktisch „zerstörungsfrei“ – auf die Qualität des Endprodukts zu schließen. Die Qualitätskontrolle seitens des Bestellers fand sicherlich durch eine visuelle Prüfung bei der Anlieferung auf der Baustelle, letztlich aber mit der die Bauarbeiten abschließenden Belastungsprobe statt. Wichtig war zunächst, dass die Lager der geforderten Belastung standhielten. Inwieweit jedoch während der Nutzungsperiode der Brücke auch die Gebrauchstauglichkeit der Lager kontrolliert wurde, bleibt fraglich. Zwar finden sich in der Literatur entsprechende Hinweise, dass schon in der Mitte des 19. Jahrhunderts die Wirkungsweise durch immer wiederkehrende Prüfungen in den ersten Nutzungswochen oder -monaten geprüft wurde (vgl. dazu Abschnitt 6.2), jedoch in der Regel an exponierten Bauwerken. Ein routinemäßiges Monitoring im Sinne einer Qualitätskontrolle für jedes Bauwerk war in dieser Zeit nicht zu erwarten. Die Impulse für erste verbindliche Festlegungen kamen auch hier von der Bahn in Form von Vorschriften, welche die Lieferung und/oder Aufstellung eiserner Brückenüberbauten regelten (Tab. 19).

Tab. 19: Zusammenstellung der Regelwerke betreffs „Besonderer Vertragsbedingungen“

Jahr, Ort		Verweis
1885, Bayern	„Besondere Bedingnisse für die Ausführung eiserner Brücken-Überbauten“	K7- 3
1891, Preußen	„Besondere Vertragsbedingungen für Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen“	K7- 6
1895, Sachsen	„Besondere Bedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen zu Brücken und Hochbauten“	K7- 13
1896, Preußen/Hessen	„Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen“	K7- 15
1904, Württemberg	„Besondere Bedingungen für die Aufstellung von Eisenkonstruktionen zum Brücken- und Hochbau“	K7- 21
1908, Bayern	„Besondere Vertragsbedingungen für die Ausführung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen“	K7- 22
1912, Preußen/Hessen	„Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Anlieferung und Aufstellung von Eisenbauwerken“, 2.ergänzte Auflage	K7- 23

Die *Besonderen Vertragsbedingungen*... verstanden sich als Ergänzung zu den ab 1886 erschienenen *Normalbedingungen*. Letztere definierten Materialqualität und -prüfung aus Sicht der Hersteller, die *Besonderen Bedingungen*... spezifizierten gegebenenfalls die Konditionen aus Sicht der Besteller im konkreten Anwendungsfall¹⁸². Tab. 20 zeigt am Beispiel der Prüfung von Gusseisen, dass die Anforderungen in den *Besonderen Vertragsbedingungen* sowie in den *Besonderen Bedingungen* sich oft an den Vorgaben in den *Normalbedingungen* – also an den Vorgaben der Hersteller – orientierten. Als Hintergrund dafür können wohl die zum ausgehenden 19. Jahrhundert einsetzenden Bemühungen um einheitliche Prüfmethode n gelten¹⁸³.

Tab. 20: Anforderungen bezüglich der Prüfung von Gusseisen in den Regelwerken

Jahr, Ort		Verweis
1885 Bayern	Besondere Bedingnisse für die Ausführung eiserner Brücken-Überbauten: „Von jeder Sorte der zur Ausführung bestimmten Materialien werden vor ihrer Verarbeitung einige Stücke [...] geprüft und wird bei nicht entsprechendem Befunde die ganze Sorte als vertragswidrig verworfen [...].“	K7- 3
1886 Deutschland	Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken [...]: „Es muß möglich sein, mittels eines gegen eine rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schrages einen Eindruck zu erzielen, ohne daß die Kante abspringt. [...] Ein unbearbeiteter quadratischer Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht.“	K7- 4
1891 Preußen	Besondere Vertragsbedingungen für Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen: „Es muß möglich sein, mittels eines gegen eine rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schrages einen Eindruck zu erzielen, ohne daß die Kante abspringt. [...] Ein unbearbeiteter quadratischer Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht.“	K7- 6

¹⁸² Erst um 1880 begannen die Hersteller, mit der Verbraucherseite bei der Festlegung von Qualitätsstandards für Eisen und Stahl zu kooperieren, getrieben unter anderem von den mit der Einführung von Flusstahl aufkommenden Diskussionen, Problemen und Unsicherheiten. Hatte sich der Technische Verein des Eisenhüttenwesens einer 1876 vom Verein Deutscher Eisenbauverwaltungen geforderten staatlich anerkannten Klassifikation von Eisen und Stahl unter Zugrundelegung des Zugversuches noch widersetzt [498/S.35], so wurden die *Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau* (1886) schon unter Mitwirkung des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute und die *Vorschriften für die Lieferung von Eisen und Stahl* (1889) direkt vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute erarbeitet. [527]

¹⁸³ Die Bemühungen begannen 1884 durch *Conferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfmethode n für Bau- und Constructionsmaterialien* zunächst auf nationaler, bald auf internationaler Ebene. Ergebnis dieser zunehmenden Vernetzung war 1895 die Gründung des Internationalen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik (IVM), sowie 1896 des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik (DVM) [498/S.54]. Wenngleich nach der Jahrhundertwende mit guten Erfolgen, so wurden die Bemühungen zur Vereinheitlichung der Prüfverfahren durch den Ersten Weltkrieg gestoppt. Die Ergebnisse der zahlreichen Tagungen bildeten jedoch eine wertvolle Grundlage für die in der Zwischenkriegszeit einsetzende Normbewegung, die fortan Fragen zu den Werkstoffen und Prüfverfahren regeln sollte [527/S.77].

1893, Deutschland	Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau, 2.Auflage: Siehe 1.Auflage von 1886	K7- 9
1895 Sachsen	Besondere Bedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen zu Brücken und Hochbauten: Verfasst in Form von „Zusatzbestimmungen“ zu den „Normalbedingungen“ von 1893, somit Anforderungen der „Normalbedingungen“ verbindlich	K7- 13
1896, Preußen/ Hessen	Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen: „Ein quadratischer Stab (30 mm), auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können [...]. Es muß möglich sein, mittels eines gegen die rechtwinklige Kante des Gußstückes geführten Hammerschlages einen Eindruck zu erzielen, ohne daß die Kante abspringt.“	K7- 15
1904, Württemberg	Besondere Bedingungen für die Aufstellung von Eisenkonstruktionen zum Brücken- und Hochbau: „Die Prüfung der Gußeisenteile beschränkt sich im allgemeinen auf die äußere Besichtigung und auf die Kontrolle der Maße. Es ist jedoch vorbehalten, auch Zerreiß-, Schlag- und Biegeproben anzustellen. Zu letzterem Zwecke sind auf Verlangen gleichzeitig mit den Gebrauchsstücken 3 Musterbarren von je 1,20 m Länge und 30/30 mm Querschnitt zu gießen [...]. Es muß möglich sein, mittels eines gegen die rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schlages einen Eindruck zu erzielen, ohne daß die Kante abspringt. Ein unbearbeiteter quadratischer Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht.“	K7- 21
1908 Bayern	Besondere Vertragsbedingungen für die Ausführung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen: „Es muß möglich sein, mittels eines gegen eine rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schlages einen Eindruck zu erzielen, ohne daß die Kante abspringt. Ein unbearbeiteter Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Einzellast in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht.“	K7- 22
1912, Preußen/ Hessen	Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Anlieferung und Aufstellung von Eisenbauwerken“, 2. ergänzte Auflage: „Für die Biegeproben von Gußeisen muß der Probestab unbearbeitet und aus dem Abstich hergestellt sein, der zur Anfertigung der Gußstücke verwendet ist. Er muß bei einem Kreisquerschnitt von 30 mm Durchmesser und 650 mm Länge auf zwei 600 mm voneinander entfernten Stützen liegend, in der Mitte eine allmählich bis auf 460 kg zunehmende Belastung ertragen, bevor er bricht. Die Durchbiegung darf hierbei nicht weniger als 6 mm betragen.“	K7- 23
1921 DIN 1000	„Ein unbearbeiteter Stab mit Kreisquerschnitt von 30 mm Durchmesser und etwa 650 mm Länge, welcher aus demselben Abstiche, der zum Anfertigen der Gußstücke Verwendung findet, herzustellen ist, muß auf zwei 600 mm voneinander entfernten Stützen liegend eine allmählich bis zu 460 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht. Die Durchbiegung hierbei darf nicht unter 6 mm betragen.“	K7- 26

Die Zusammenstellung zeigt deutlich, dass bis ins 20. Jahrhundert hinein in den Ländern praktisch die Vorgaben der *Normalbedingungen* von 1886 übernommen wurden. Erst die preußisch/hessischen *Vorschriften* von 1912 weichen von diesen Vorgaben ab: neben der Geometrie des Probestabes gab es nun auch einen veränderten Versuchsaufbau bei leicht erhöhter Probelast. Zusätzlich wurde über eine Mindestdurchbiegung des Probestabes unter Belastung seine Duktilität sichergestellt. Die Angaben der preußisch/hessischen *Vorschriften* wurden 1921 in die Neuauflage der *Normalbedingungen* – nun als *DIN 1000* – überführt, die fortan die Qualitätskontrolle regelten.

Während es zum Gusseisen, also schon seit den 1880er-Jahren, ganz konkrete Vorgaben zur Prüfung der Materialqualität gab, so beschränkten sich die Angaben zur Prüfung vergossenen Stahls auf wenige Aussagen zu mechanischen Eigenschaften, wie Zugfestigkeit und Dehnung, ohne dass dabei prinzipiell zwischen gewalztem und vergossenem Stahl unterschieden wurde. Stellvertretend seien hier die *Normalbedingungen* von 1893 zitiert: „Die aus Flusstahl herzustellenden gegossenen oder geschmiedeten Teile (Auflagerteile oder dergl.) sollen eine Festigkeit von 45 bis 60 kg/qmm und eine Dehnung von mindestens 10 pCt aufweisen“ [389/§3], was im Wesentlichen in dieser Form in die *Normalbedingungen* von 1921 (*DIN 1000*) übernommen wurde.

5.5.4 Wertung und Zusammenfassung

Von zentraler Bedeutung ist nach Auswertung der historischen Literatur die Feststellung, dass die Konstrukteure bereits im 19. Jahrhundert begannen, die Materialeigenschaften während der Herstellung durch gezielte Maßnahmen für bestimmte Zwecke zu verbessern. Schmiedeeisen, selbst weiches Schweißisen, konnte durch Zementieren nachgekühlt und anschließendes Härten zu einem äußerst oberflächenharten Stahl veredelt werden. Die Qualität von Gusseisen war insbesondere im Zuge der zweiten Schmelzung steuerbar, der Schallenguss ermöglichte darüber hinaus ein Endprodukt mit harter Oberfläche – eine willkommene Methode zur Oberflächenveredelung hoch belasteter Wälzkörper. Und die Qualität des sich zum ausgehenden 19. Jahrhunderts als Werkstoff für Brückenlager durchsetzenden Stahlgusses war insbesondere durch die Zugabe ausgewählter Legierungselemente steuerbar. Die Tatsache, dass Brückenlager – abweichend von den „gewöhnlichen“ Bauteilen des Über- und Unterbaus – extreme Lasten durch minimierte Kontaktflächen abzuleiten und die dabei beteiligten Bauteile kinematisch zu verbinden hatten, legt die Anwendung der kompletten metallurgischen Möglichkeiten innerhalb des gesamten Untersuchungszeitraums nahe. Eine pauschale Einordnung des historischen Lagermaterials in für Zwecke des Hochbaus typische zeitgenössische Baustoff- oder Festigkeitsklassen scheint demnach nicht angemessen und dürfte in der Regel den spezifischen Eigenschaften des Lagermaterials nicht gerecht werden. Die hervorragende Qualität des zeitgenössischen Materials wird nicht zuletzt durch den noch immer in Nutzung befindlichen Bestand an historischen gusseisernen und stählerne Brückenlagern unterstrichen, die trotz zeitweise mangelnder Wartung und Pflege, Kriegseinflüssen und gesteigerter Belastung nach wie vor ihre Aufgabe erfüllen. Lagerschäden, die auf mangelnde Materialqualität oder Unachtsamkeit bei der Herstellung zurückgehen, sind nicht überliefert.

6 Bewegungslager in Gusseisen und Stahl

Mit der Zunahme von Sanierungsaufgaben an bestehenden Brückentragwerken stehen auch die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager wieder im Fokus der Ingenieure. Dank ihrer robusten Bauart befinden sich die Lager sehr oft in erstaunlich gutem Zustand, trotz teilweise über einhundert „Dienstjahren“. Für die Beurteilung der Tragfähigkeit hilft oft nur ein Rückgriff auf die zeitgenössischen Bemessungsansätze und Versuchsergebnisse, die zum größten Teil aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts stammen und die den konstruktiven Reifeprozess dieser Lagertechnologie begleiteten. Zwei Aspekte bzw. Fragen bestimmten ursprünglich die Entwicklung dieser Generation von Brückenlagern, sowohl bei der konstruktiven Durchbildung als auch bei der Ableitung von Bemessungsansätzen:

- das „Berührungsproblem“: Wie lassen sich bei der Übertragung großer Druckkräfte auf kleinste Flächen die Verformungen und Spannungen in den Berührungsflächen (nachfolgend auch „Kontaktflächen“ genannt) erfassen?
- das „Reibungsproblem“: Wie wirken sich die beim Lastabtrag in den Kontaktflächen auftretenden Verformungen auf die Reibung der sich gegeneinander bewegenden Lagerteile und damit auf die Gebrauchstauglichkeit der Brückenlager aus? [128/S.556].

Aus heutiger Perspektive ergibt sich eine zusätzliche Fragestellung zu zeitabhängigen Einflüssen wie

- Verschleiß und Materialermüdung: Welche Auswirkungen hatten jahrzehntelange Belastung und mögliche Veränderungen innerhalb des Materialgefüges auf die Brückenlager?

Im Folgenden werden nach einer kurzen Beschreibung der Problemstellung die historischen Grundlagen zusammengestellt sowie gewertet.

6.1 Das Berührungsproblem

Die Technische Mechanik beschreibt als Berührungsproblem allgemein die Kraftübertragung im Kontaktbereich unterschiedlich gekrümmter Flächen. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig, man denke nur an die Berührung zwischen Wagenrad und Schiene. Unterschiedlich sind auch die Berührungsmöglichkeiten bei Brückenlagern. Sie reichen vom Kontakt zwischen Walze und Ebene bis zum Kontakt zwischen geometrisch konkav und konvex gekrümmten Kugelausschnitten. Im ersten Fall ergibt sich als Kontaktfläche idealisiert eine Linie, im zweiten Fall ein Punkt. Die gesamte Auflagerkraft von Brücken muss jeweils durch einige wenige dieser minimierten Kontaktflächen in den Unterbau übertragen werden. Entsprechend der Last erweitert sich die Berührungsfläche bis zum Einstellen eines Kräftegleichgewichts. Im Falle einer vollständigen Entlastung bilden sich die Berührungsflächen zu Linie oder Punkt

zurück, vorausgesetzt, die Spannungen in der Kontaktzone sind innerhalb des linear-elastischen Werkstoffbereichs geblieben. Unter Betriebsbedingungen mit praxistauglichen Abmessungen kommt es jedoch zu örtlichen Plastizierungen, die es bei der Dimensionierung zu begrenzen galt, um die Gebrauchstauglichkeit des Lagers nicht zu gefährden.

6.1.1 Anfänge

Ein ganz wesentlicher Mangel der anfangs im eisernen Brückenbau verwendeten Flächenlager war der undefinierte und variierende Auflagerpunkt des Überbaus. In Abhängigkeit von Lagerjustierung und Durchbiegung des Trägers wurde eine unterschiedliche Anzahl von Lagerwalzen aktiviert (vgl. Punkt 4.3.1). Der Lastabtrag gestaltete sich eher zufällig. Daran konnten selbst die oft noch ergänzend eingelegten hölzernen Unterlagen nur wenig ändern, die neben ihrer Wirkung als Stoßdämpfer zusätzlich eine Rotationsfähigkeit des ganzen Lagers und damit einen möglichst flächigen Lastabtrag ermöglichen sollten.

Bei der Dimensionierung der Walzen dieser frühen Lager begnügte man sich „[...] mit rohen Erfahrungsregeln, die aber stark voneinander abwichen und nur zum geringsten Teil auf Versuchen gegründet waren“ [128/S.557]. Ergebnisse solcher Versuche hatte VICAT bereits 1833 veröffentlicht¹⁸⁴. Die Bruchlast einer Walze, gedrückt zwischen zwei ebenen Körpern, betrug demnach „[...] den 3. Teil der Bruchlast eines Prismas von der Grundfläche gleich der Durchmesserenebene des Zylinders“ [K1- 1]. Inwieweit VICATS Ergebnisse bei der Dimensionierung von Brückenlagern zur Jahrhundertmitte bekannt waren bzw. berücksichtigt wurden, blieb unklar. Die Anwendung wäre jedoch aus verschiedenen Gründen wenig sinnvoll gewesen. Zum einen bezogen sich seine Angaben auf andere als für Brückenlager verwendete Materialien, zum anderen gestattete der undefinierte Lastabtrag der Flächenlager keine verlässlichen Angaben zur Belastung einzelner Lagerwalzen. Erst durch den Einbau besonderer Kippvorrichtungen gelang die Fixierung des theoretischen Auflagerpunktes bei allen Lastzuständen und eine annähernd gleichmäßige Verteilung der Auflast auf die Lagerwalzen. Diese Klarheit im Lastfluss ermöglichte präzisere Angaben zur Belastbarkeit der Walzen.

Ganz frühe Hinweise zur Dimensionierung von Lagerrollen bzw. -stelzen finden sich erneut bei GERBER und SCHWEDLER. GERBER – unter der Leitung v.PAULIS mit der Bauausführung der Großhesseloher Isarbrücke betraut [499/S.74] – beschrieb 1859 ausführlich das PAULI-

¹⁸⁴ VICATS Versuche zu Walzen waren Teil einer umfassenden Versuchsserie an Würfeln, Prismen, Pyramiden, Kugeln zur Bestimmung des Bruchverhaltens.

sche Brückensystem. Er äußerte sich dabei zu den von WERDER konstruierten Berührungs-Kipplagern der Großhesseloher Brücke:

„Man wendete Stelzen, also Stücke von Walzen an, weil offenbar der Druck, dem man eine Walze aussetzen darf, mit dem Durchmesser derselben zunimmt, daher man durch größere Höhe an der Gesamtlänge der Stelzen und dadurch zugleich an der Größe der Auflagerplatten spart [...] Der Druck per Längeneinheit wurde proportional dem Radius r gesetzt und für die gußeisernen Stelzen zu $12 r$ Kgr. per Ldf. Centimeter genommen; innerhalb der Grenzen, in denen sich r bewegt, ist diese Annahme gewiß statthaft“ [K2- 1].

Zwei Jahre später schrieb SCHWEDLER zur Dimensionierung der Lager seiner Brahe-Bücke bei Czersk (1861) [K2- 2]:

„Der Druck einer ebenen Gußeisenfläche auf eine Gußeisenrolle kann pro Zoll Durchmesser und pro Zoll Länge derselben 1 Ctr. betragen, ohne dass die Elasticität des Materials alterirt wird“.

Gegenüber WERDERS Bemessung fand der Ansatz SCHWEDLERS vergleichsweise weite Verbreitung, was sicherlich – wenngleich nur beiläufig zitiert – der Veröffentlichung in der *Zeitschrift für Bauwesen* zu verdanken ist, einem bedeutenden Forum für Bauingenieure im 19. Jahrhundert. WERDERS Formel hingegen erschien in einer zur Großhesseloher Brücke publizierten Broschüre [155], die jedoch nahezu unbekannt blieb. Bedauerlicherweise fanden sich bisher für die Ansätze WERDERS und SCHWEDLERS zum Berührungsproblem keine Hinweise über den Ursprung ihrer Kalkulation. Sie selbst ließen offen, wer für die Bemessungsansätze verantwortlich war bzw. ob theoretische Überlegungen oder Versuche die Grundlage der Angaben bildeten. Theoretisch begründete Bemessungsansätze wie auch Versuche explizit zum Berührungsproblem sind in der Literatur erst ab ca. 1870 belegt.

6.1.2 Theoretische Bemessung

Nach der Jahrhundertmitte machte sich auch bei der Bemessung der Rollenlager

„[...] doch endlich das Bedürfnis geltend, besser begründete Formeln für die Errechnung des Rollendurchmessers bei gegebener Last [...] zur Hand zu haben“ [128/S.557].

Beginnend mit KÖPKES Gleichung von 1869 erschienen eine Reihe von Bemessungsansätzen, die ausgehend von theoretischen Modellbildungen das Berührungsproblem zu beschreiben versuchten. Das jeweilige Vorgehen war üblicherweise wie folgt gekennzeichnet¹⁸⁵ (Abb. 87):

¹⁸⁵ Zu den prinzipiellen Ansätzen siehe [54/S.291f],[286/S.476].

- Ansatz einer Berührungsfläche,
- geometrische Annahmen für die Verformung von Walze und Platte,
- Untersuchung nebeneinander liegender prismatischer Körper ohne Übertragung von Schubkräften als Vereinfachung
- Ansatz des HOOKE'schen Gesetzes und Annahmen für Werkstoffkennwerte,
- Beschränkung auf die Berührungsmittelpunkte (dort Spannungsmaximum),
- Auswertung und Vereinfachung auf einfach handhabbare Formeln.

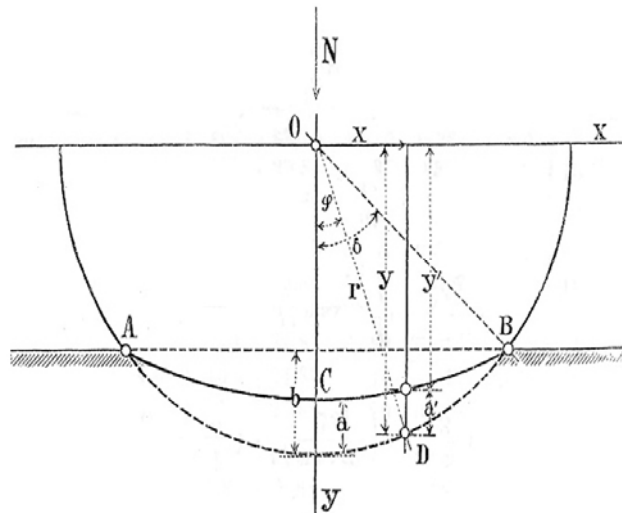


Abb. 87: Geometrisch-mechanisches Modell für die Ableitung von Bemessungsformeln, hier nach TETMAJER [350]

In Anlehnung an KOLLMARS Auswertung in [57/S.46] ergibt sich Tab. 21, die die Angaben der Verfasser werkstoffbezogen zusammenfasst.

Die erheblich voneinander abweichenden Angaben waren Ergebnis unterschiedlicher theoretischer Annahmen, die nur bedingt den Gegebenheiten der Praxis entsprachen und keinen Anspruch auf Genauigkeit hatten. Schon 1894 hatte WEYRAUCH die damals üblichen Bemessungsformeln als „[...] Notbehelfe in Ermangelung besserer Anhaltspunkte“ [105/S.134] bezeichnet. Solche „Faustformeln“ erschienen noch im frühen 20. Jahrhundert, wie z.B. VIANELLOS¹⁸⁶ Gleichungen von 1905, die – wie er selbst betonte „[...] im Einklang mit guten Ausführungen stehen, sich aber wissenschaftlich nicht rechtfertigen lassen“ [259/S.476].

¹⁸⁶ LUIGI VIANELLO (1862-1907).

Tab. 21: Erforderliche Walzengeometrie (Anzahl n , Länge l , Radius r) in Abhängigkeit von der Auflast A (Auflast in t , Länge und Radius in cm)

Jahr	Name	Gusseisen	Gussstahl/ Stahlguss	Schmiedeeisen/-stahl		Verweise auf	
		$n \cdot l \cdot r =$	$n \cdot l \cdot r =$	$n \cdot l \cdot r =$ Schweiß-	$n \cdot l \cdot r =$ Fluss-	Literatur	Katalog
1869	Köpke	48 A	13...18 A	-	-	[182/S.61]	K2- 4
1869	Fränkel	21...25 A	14...16,5 A	-	-	[149/S.196]	K2- 5
1874	Stévar ¹⁾	-	-	-	-	[91/S.158]	K2- 6
1874	Kübler ¹⁾	-	-	-	-	[60/S.235]	K2- 7
1875	Bäuerle ¹⁾	-	-	-	-	[57/S.44]	K2- 8
1875	Winkler	10...19,5 A	8...15,5 A	10...19,5 A	-	[108/S.277]	K2- 9
1876	Baentsch	57 A	26 A	81 A	-	[105/S.134]	K2- 10
1876	Laissle/Schübler	16...25 A	-	-	-	[57/S.46]	
1878	Grashof ¹⁾	-	-	-	-	[316/S.51]	K2- 11
1882	Steiner	15 A	12 A	-	-	[236/S.505]	K2- 13
1888	Haeseler	16,5...23 A	18 A	-	-	[161/S.46]	K2- 14
1889	Reuleaux ²⁾	27,5...33,5 A	10...13 A	-	34,5...41,5A ³⁾	[340/S.510]	K2- 15
1889	Tetmajer	16,5 A	8 A	16,5 A	12,5 A	[349/S.148]	K2- 16
1889	Bach	20 A	9 A	-	-	[286/S.477]	K2- 17
1905	Vianello	10 A	10 A	-	-	[259/S.476]	K2- 21
1905	Tetmajer	25 A	25...36 A	24 A	15 A	[350/S.276]	K2- 20

¹⁾ In den Formeln der Autoren blieben Konstanten unerklärt, so dass sich keine Formel ableiten ließ.

²⁾ Auf dem Buchtitelblatt von [340] ist als Erscheinungsjahr „1882-1889“ ausgewiesen, so dass dem Ansatz Reuleaux kein konkretes Erscheinungsjahr zugeordnet werden konnte. Auf der für Reuleaux „ungünstigen Seite liegend“ entschied sich der Verfasser der vorliegenden Arbeit für 1889.

³⁾ Angabe pauschal für Schmiedeeisen.

Eine neue „strenge Lösung“ zur Beschreibung der Vorgänge im Kontaktbereich zweier gekrümmter Körper hatte bereits 1881 der Physiker HERTZ¹²⁴ veröffentlicht [317], die 1884 unter dem Titel „Ueber die gegenseitige Zusammendrückung elastischer Körper mit gekrümmten Oberflächen“ in der *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* sich direkt an die Baufachwelt richtete [55], zunächst jedoch unbeachtet blieb. Erst nachdem WEYRAUCH ein Jahrzehnt später die Nützlichkeit des HERTZ'schen Ansatzes für die Behandlung des Berührungsproblems in der Praxis unterstrichen hatte [105], begann sich dieser allmählich für die Bemessung gusseiserner und stählerner Brückenlager zu etablieren.

Ausgehend von Anschauungen über die Verteilung der Elektrizität(!) bei der Berührung zweier Körper¹⁸⁷ ermittelte HERTZ Spannungen und Formänderungen im Kontaktbereich fester Körper. Aus dem allgemeinen Fall einer elliptischen Kontaktfläche leitete er die beiden Grenzfälle einer kreisrunden und rechteckigen Druckfläche ab [353/S.4]. Aus diesen wiederum ließen sich vereinfachte Formeln für den praktischen Gebrauch bei der Lagerbemessung herleiten. Für den hier zu untersuchenden Kontakt zwischen Lagerwalze und Lagerplatte – also zwischen Zylinder und Ebene – ergab sich nach HERTZ eine maximale Pressung σ_H im Kontaktbereich:

Gleichung 1:
$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot E}{r}}$$

...mit p als Streckenlast, E als Elastizitätsmodul, r als Walzenradius.

Der HERTZ'sche Ansatz basiert vor allem auf folgenden Annahmen:

- die Berührungsflächen sind im Verhältnis zu ihren Oberflächen unendlich klein,
- der Druck wird senkrecht zu den Kontaktflächen übertragen,
- die Baustoffe beider Körper müssen homogen und isotrop sein,
- die Proportionalitätsgrenze wird im Kontaktbereich nicht überschritten [57/S.47].

Für den praktischen Anwendungsfall einer Lagerbemessung trafen alle diese Annahmen nur eingeschränkt zu. So waren z.B. bei vertretbaren Lagerabmessungen unter hohen Belastungen Plastizierungen im Berührungsbereich unvermeidbar. Die damit einhergehenden Kaltverfestigungen führten unter anderem zu einer Aushärtung in der Kontaktzone und damit zu zusätzlichen Inhomogenitäten innerhalb des Lagermaterials. HERTZ selbst verwies schon auf mögliche Diskrepanzen zwischen theoretischem Modell und Praxisfall:

„Denn es könnte ja sein, daß die wirklichen Körper den Vorstellungen der Homogenität, welche wir zugrunde gelegt haben, sehr wenig entsprechen; es ist ja bekannt genug, daß die Festigkeitsverhältnisse in der Nähe der Oberfläche, auf welche es uns hier ankommt, häufig ganz andere sind, als diejenigen im Inneren der Körper“ [318/S.195].

Trotz Unstimmigkeiten zwischen Theorie und Praxis hatten sich die HERTZ'schen Gleichungen „[...] im wesentlichen bewährt, und [...] werden daher in der Technik neuerdings häufig benutzt“ schrieb AUGUST FÖPPL 1920 in seinen *Vorlesungen über Technische Mechanik*

¹⁸⁷ Siehe dazu [57/S.48], [79/S.6, Fußnote], [80/S.13].

[304/S.440]. Mangels wissenschaftlich begründeter Alternativen bildeten sie in den 1920er-Jahren die Grundlage für erste Normierungsversuche von Brückenlagern [457/S.417] und gelten heute allgemein als Ansatzpunkt bei der Behandlung des Berührungsproblems.

Insbesondere für die heutige statisch-konstruktive Begutachtung historischer Brückentragwerke ist es interessant, die Ergebnisse der bis ins 20. Jahrhundert hinein gebräuchlichen Faustformeln mit den HERTZ'schen Formeln zu vergleichen. Dazu wird Gleichung 1 durch einige Umformungen dem Format der Formeln in Tab. 21 angepasst:

Bringt man die Streckenlast p durch

Gleichung 2:
$$p = \frac{A}{n \cdot l}$$

...in Bezug zu Auflast A , Walzenanzahl n und –länge l , so folgt mit

Gleichung 3:
$$n \cdot l \cdot r = 0,175 \cdot \frac{E \cdot A}{\sigma_H^2}$$

...eine Gleichung, deren Werte vom Elastizitätsmodul E des verwendeten Werkstoffes, von der Auflast A und der HERTZ'schen Pressung σ_H abhängen.

Bezüglich einer zulässigen Pressung σ_H im Kontaktbereich war man lange Zeit im Unklaren. „Wollte man die bei Eisen-Konstruktionen sonst üblichen Werthe wählen, so würden sich [...] ganz unmögliche Rollenzahlen ergeben“ [105/S.139] betonte WEYRAUCH 1894 und ergänzte, dass die Verhältnisse beim Zugversuch kaum mit denen im Kontaktbereich korrelieren:

„Es handelt sich [...] um ein örtlich sehr beschränktes Zusammendrücken, welches aufhört, sobald durch Vergrößerung der Berührungsfläche und Erhöhung der Elasticitätsgrenze und Quetschgrenze genügende Widerstandsfähigkeit erreicht ist“ [105/S.141]¹⁸⁸.

Da Versuche zu verlässlichen Werten fehlten, orientierte man sich an bereits ausgeführten Brücken. Diese Synthese aus Theorie und Praxis war nicht neu. Bereits WINKLER vervollständigte 1875 die Unbekannten zum Material in seiner Formel (K2- 9) aus Erfahrungswerten an gebauten Beispielen [108/S.275]. Auch bezüglich zulässiger HERTZ'scher Pressungen bedienten sich die Ingenieure der Empirie. So analysierte WEYRAUCH 1894 einige

¹⁸⁸ Ähnliche Hinweise, im Kontaktbereich von Brückenlagern auf Grund behinderter Querdehnung höhere zulässige Spannungen zu gewähren, finden sich zur selben Zeit auch bei BACH in [3/S.199] und im Ausland bei CRANDALL/MARSTON in [17/S.123].

der in Tab. 21 genannten Formeln und stellte fest, „[...] dass bei ausgeführten Brücken die Elasticitätsgrenze mitunter überschritten wurde“ [105/S.140] und schlussfolgerte daraus die in Tab. 22 aufgeführten noch vorsichtigen Empfehlungen für zulässige HERTZ'sche Spannungen. Ebenso verwies KOLLMAR 1914 auf ausgeführte Beispiele mit 8 bis 10 t/cm² HERTZ'scher Pressung [57/S.50] und begründete somit den von ihm gewählten Wert.

Nachfolgende Tab. 22 gibt einen Überblick über die Entwicklung der empfohlenen bzw. zulässigen Spannungen – von WEYRAUCHS erstem vorsichtigen Ansatz bis zu den im Normen- und Regelwerk verankerten Werten im späten 20. Jahrhundert.

Tab. 22: Entwicklung der empfohlenen/zulässigen Spannungen für die HERTZ'schen Gleichungen [t/cm²]

Jahr	Name	Gusseisen	Stahlguss	Flusseisen/stahl	Schmiedestahl	Literatur
1894	Weyrauch	2,0...3,0	3,0...4,8	2,0...3,0		[105/S.142]
1900	Kübler	-	-	6,0 ¹⁾	-	[61/S.216]
1908	Schaper	max 4,0 ³⁾ max 3,5 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 6,0 ⁴⁾	max 5,0 ³⁾ max 4,5 ⁴⁾	-	[237/S.353ff]
1911	Bernhard	max 4,0 ¹⁾ max 3,0 ²⁾	max 7,0 ¹⁾ max 5,25 ²⁾	-	-	[126/S.352]
1914	Kollmar	-	6,0	-	-	[57/S.55]
1922	Schaper	max 4,0 ³⁾ max 3,0 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 5,5 ⁴⁾	max 5,0 ³⁾ max 4,0 ⁴⁾	max 7,5 ³⁾ max 6,5 ⁴⁾	[240/S.665f]
1922	B.E. (vorläufige Fassung)	max 4,0 ³⁾ max 3,0 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 5,5 ⁴⁾	max 5,0 ³⁾ max 4,0 ⁴⁾	max 7,5 ³⁾ max 6,5 ⁴⁾	
1923	Erlass Reichsminister	max 5,0 ³⁾ max 4,0 ⁴⁾	max 8,5 ³⁾ max 7,5 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 5,5 ⁴⁾	max 9,5 ³⁾ max 8,5 ⁴⁾	[410/S.363]
1925	B.E. (1.Ausg.) (Deutsche Reichsbahn)	max 5,0 ³⁾ LF H max 4,0 ⁴⁾ LF H max 6,0 ³⁾ LF HZ max 5,0 ⁴⁾ LF HZ	max 8,5 ³⁾ LF H max 7,5 ⁴⁾ LF H max 10 ³⁾ LF HZ max 9,0 ⁴⁾ LF HZ	max 6,5 ³⁾ LF H max 5,5 ⁴⁾ LF H max 8,0 ³⁾ LF HZ max 7,0 ⁴⁾ LF HZ	max 9,5 ³⁾ LF H max 8,5 ⁴⁾ LF H max 12 ³⁾ LF HZ max 11 ⁴⁾ LF HZ	[413/S.45f]
1931	DIN 1073 (Straßenbrücken)	wie B.E. von 1925				[421/§16]
1937	DIN 1050 (Hochbau)	wie B.E. von 1925				[433/Tafel 3]
1953	DIN 1050	wie B.E. von 1925				[352/S131]
1981	DIN 18 800 – 1	max 5,0 ⁵⁾ LF H max 6,0 ⁵⁾ LF HZ	max 8,5 ⁵⁾ LF H max 10,5 ⁵⁾ LF HZ	max 6,5 ⁵⁾ LF H max 8,0 ⁵⁾ LF HZ	max 8,0 ⁵⁾ LF H max 10 ⁵⁾ LF HZ	[640/8.106]

¹⁾ Einrollenlager, ²⁾ mehr als eine Rolle, ³⁾ Ein- und Zweirollenlager, ⁴⁾ mehr als 2 Rollen

⁵⁾ Bei mehr als 2 Rollen Ermäßigung auf 85%

Tab. 22 verdeutlicht anschaulich, wie sich innerhalb von knapp drei Jahrzehnten – zwischen 1894 und dem Erlass des Reichsverkehrsministers 1923 – die für die HERTZ'schen Gleichungen empfohlenen Spannungen ungefähr verdoppelten. Dabei mögen die schon 1900 von KÜBLER/CAUER vorgeschlagenen hohen Spannungen für Einrollenlager aus Flusseisen/

-stahl verwundern. Für diese Zeit bahnbrechend, nahmen sie aber nur die weitere Entwicklung hin zu Einrollenlagern vorweg, welche sich nach der Jahrhundertwende zunehmend in der Brückenlagerpraxis etablieren sollten. Aus der Perspektive von 1900 begründete CAUER die Vorteile von Einrollenlagern, die bis dato kaum angewandt worden waren, sowie die von KÜBLER empfohlenen 6 t/cm² aus materialtechnischer und statisch-konstruktiver Sicht:

„Zieht man [...] in Betracht, dass jetzt für solche Zwecke viel besseres und härteres Material zugebote steht als in früheren Zeiten, und dass man bei e i n e r Rolle oder e i n e m Pendel schon deshalb mit der Belastung erheblich höher gehen darf, weil hier keine Zweifel über die Lastverteilung entstehen, so dürfte die von Herrn Kübler unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Hertzschen Theorie für zulässig erachtete Beanspruchung von 6 t/qcm nicht zu hoch gegriffen sein“ [16/S.918].

Nach sukzessiven Erhöhungen der zulässigen Spannungen sind die Werte seit dem *Erllass des Reichsverkehrsministers* als Vorgriff auf die 1925 erschienenen ersten Berechnungsgrundlagen *B.E.* der Reichsbahn unverändert geblieben – ein Spiegel des beginnenden wissenschaftlichen Stillstands bezüglich der Auseinandersetzung mit dem Berührungsproblem.

6.1.3 Praktische Versuche

Aus heutiger Sicht mag es verwundern: Im Jahr 1901 – der Brückenbau in Deutschland kann auf inzwischen nahezu ein halbes Jahrhundert Erfahrung mit walzen- oder stelzengelagerten gusseisernen und stählernen Brückenlagern zurückgreifen – betonte VIANELLO in der März-sitzung des Berliner VDI-Bezirksvereins, „[...] wie notwendig es sei, Versuche anzustellen, um die zulässige Belastung von Brückenauflagern festzustellen, mit Rücksicht sowohl auf die Festigkeit als auch auf die Beweglichkeit“ [112/S.1228]. Analysiert man jedoch Tab. 23, welche die bis dahin wichtigsten ausgeführten Versuche zum Berührungsproblem mit den jeweiligen Fragestellungen zusammenfasst, wird klar, wie wenig die unter Punkt 6.1.2 besprochenen Bemessungsansätze für Walzen seinerzeit durch Versuchsergebnisse abgeglichen worden waren.

Tab. 23: Versuche in Europa zum Berührungsproblem

Jahr ¹⁾	Name ²⁾	Ort ³⁾	Fragestellung	Bereich	Verweis auf Katalog
1871	Baldermann	Deutschland	Tragfähigkeit der Walzen	Brückenbau	K1- 2
1878	Winkler	Deutschland	Verformung im Kontaktbereich	Allgemein	K1- 3
1881	Hertz	Deutschland	Verformung/Spannung im Kontaktbereich	Allgemein	K1- 4
1889	Bach	Deutschland	Verformung im Kontaktbereich	Brückenbau	K1- 6
1889	Bach	Deutschland	Verformung im Kontaktbereich	Brückenbau	K1- 7
1891	Auerbach	Deutschland	Verformung/Spannung im Kontaktbereich	Allgemein	K1- 8
1893	Deslandres	Frankreich	Tragfähigkeit der Walzen	Brückenbau	K1- 12
1895	Juselius	Schweiz	Verformung im Kontaktbereich	Brückenbau	K1- 14

1899	Stribeck	Deutschland	Tragfähigkeit von Kugeln	Maschinenbau	K1- 15
1899	Rasch	Deutschland	Tragfähigkeit von Kugeln	Maschinenbau	K1- 16
1901	Lafay	Frankreich	Erfassung der Vorgänge im Kontaktbereich	Messtechnik	K1- 17
1907	VDI	Deutschland	Tragfähigkeit der Walzen	Brückenbau	K1- 18
1912	Kgl. MPA	Deutschland	Spannungen im Kontaktbereich	Maschinenbau	K1- 19
1923	Dumas	Schweiz	Spannungen im Kontaktbereich	Brückenbau	K1- 21
1927	Bochmann	Deutschland	Erfassung der Vorgänge im Kontaktbereich	Messtechnik	K1- 22
1936	Föppl	Deutschland	Spannungen innerhalb der Körper	Maschinenbau	K1- 24
1943	SKF	Deutschland	Tragfähigkeit von Kugeln	Maschinenbau	K1- 25

¹⁾ Das angegebene Jahr entspricht in der Regel dem Jahr der Veröffentlichung, falls explizit angegeben dem Jahr der Versuchsdurchführung. Die VDI-Versuche (1907) liefen über mehrere Jahre, hier ist das Jahr der Beendigung der Versuche genannt.

²⁾ Der genannte Name ist nicht zwingend der Durchführende bzw. Beauftragende der Versuche. Eine konsequente Zuordnung war aus den Quellen nicht möglich. BALDERMANN (1871) nimmt zum Beispiel nur Bezug, war also unter Umständen an den Versuchen gar nicht beteiligt.

³⁾ Der Ort der Versuche ist nicht in jedem Fall explizit angegeben, sondern ist aus dem Wirkungskreis des Verfassers bzw. aus dem Veröffentlichungsland der Hauptquelle abgeleitet.

Die Versuche von HERTZ (1881) und AUERBACH (1891) waren zwar von hohem erkenntnistheoretischen Wert für das Berührungsproblem, blieben aber ohne praktischen Wert für die Anwendung an Brückenlagern; ähnlich auch WINKLERS Versuche (1878), die als Teil einer ganzen Versuchsreihe an Kautschukmodellen prinzipiell der Visualisierung des Verformungszustandes gezogener oder gedrückter Körper dienten, das Berührungsproblem aber nur beiläufig erwähnten.

Für den Anwendungsfall „Brückenlager“ reduziert sich Tab. 23 aus deutscher Sicht auf die Versuche von BACH¹⁸⁹ und die von BALDERMANN¹⁹⁰. Letztere müssen noch im Zusammenhang mit den Bemessungsvorgaben WERDERS und SCHWEDLERS (vgl. Punkt 6.1.1) gesehen werden, denn auch BALDERMANN schilderte seinen Ansatz zur Bemessung der Walzen eher beiläufig bei der Beschreibung eines Brückenbauwerkes, in diesem Fall der 1871 errichteten Donaubrücke in Maria-Ort¹⁹¹. Er erwähnte jedoch explizit Versuche als Grundlage seiner Bemessung. Für die gusseisernen Walzen der Kipplager ließ er pro Quadratcentimeter Projektionsfläche bis zu 50 kg Auflast zu (K1- 2). Damit sollte sich sein Ansatz schon sehr deutlich von seinen Vorgängern unterscheiden, hatte doch SCHWEDLER noch die gleiche Auflast nur pro Quadratzoll als zulässig erachtet (K2- 2). Leider sind dem Verfasser gerade für diese

¹⁸⁹ CARL VON BACH (1847-1931).

¹⁹⁰ O. BALDERMANN; dem Verfasser sind keine Lebensdaten bekannt.

¹⁹¹ Siehe dazu in [117], [204/S.61].

ersten – in einer frühen Entwicklungsphase der rollen- bzw. stelzengelagerten Kipplager – erwähnten Ansätze nur die im Katalog benannten Quellen bekannt.

Im Gegensatz zum praktischen Hintergrund bei BALDERMANN zielten die Versuchsreihen BACHs Ende der 1880er-Jahre auf die theoretische Ermittlung der Belastbarkeit von Lagerwalzen. BACH kritisierte im Zuge einer Rezension zu *Die angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre* [349] von TETMAJER¹⁹² den bis dahin üblichen Ansatz, einen Großteil der Verformungen im Kontaktbereich von Platte und Walze der Platte zuzuweisen. BACH schlussfolgerte daraus eine Unterschätzung der Anstrengung des Materials der Walze [286/S.477]. Er verwies in der Besprechung auf seine eigenen Experimente von 1889 mit Körpern aus Hartblei (K1- 6) und später mit Gusseisen (K1- 7), um zu belegen, „[...] dass die Berührungsfläche vorzugsweise durch Abplattungen der Walze, und in nur geringem Maße durch Eindrücken derselben in die Unterlagsplatte gebildet wird“ [286/S.477] (Abb. 88). Er stellte darüber hinaus den von TETMAJER in seinem Buch hergeleiteten Formeln (K2- 16) einen eigenen Bemessungsansatz (K2- 17) gegenüber, der die Erkenntnisse aus seinen Versuchen berücksichtigte und der unter sonst identischen Bedingungen 10...20 % größere Walzen ergab (siehe Tab. 21). TETMAJER veranlasste daraufhin die von JUSELIUS¹⁹³ am Schweizer Polytechnikum durchgeführten Versuche mit für Brückenlager üblichen Materialien (K1- 14), die wiederum TETMAJERS ursprünglichen Ansatz zur Verteilung der Verformungen bestätigten.

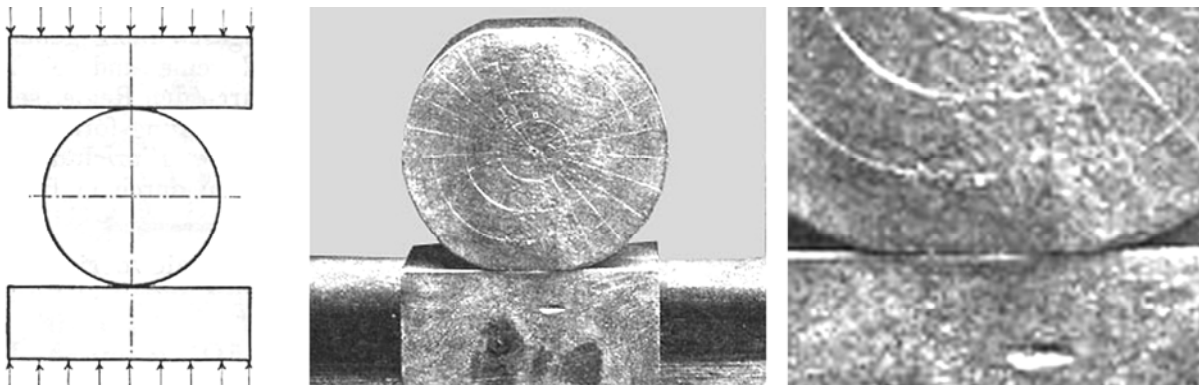


Abb. 88: Abplattungen der Walze im Kontaktbereich am Hartbleimodell [3]

¹⁹² LUDWIG VON TETMAJER (1850-1905).

¹⁹³ JUSELIUS-HELSENGFORS, unter TETMAJER Prüfingenieur in der Prüfanstalt des Schweizer Polytechnikums, dem Verfasser sind keine Lebensdaten bekannt.

Sowohl die von BACH als auch die von TETMAJER initiierten Versuche fokussierten noch einen sehr spezifischen Teilbereich des Berührungsproblems als Eingangsgröße für theoretische Herleitungen. Die Tragfähigkeit ganzer Brückenlager bzw. die Auswirkungen der Verformungen auf die Beweglichkeit der Walzen war zur Jahrhundertwende in Deutschland noch immer nicht systematisch untersucht worden. Abgesehen von einem halben Jahrhundert Erfahrung existierte demnach um 1900 wenig Quantitatives, worauf Ingenieure bei der Bemessung ihrer Brückenlager hätten zurückgreifen können. So verwundert es nicht, dass VIANELLO 1901 die erwähnten Versuche zur „Ermittlung der Festigkeit und Beweglichkeit von Rollen- und Kipplagern“ anstieß, welche umgehend im Auftrag des VDI zur Ausführung beauftragt wurden [90/S.3]. Diese Versuche fanden nach einigen Unterbrechungen 1907 ein vorläufiges Ende [90/S.10]; die Ergebnisse kamen erst 1915 zur Veröffentlichung. Ihr praktischer Nutzen war durch das eingangs zu weich gewählte Material, eine ungünstige Versuchsanordnung und eine unzureichende Messvorrichtung beeinträchtigt¹⁹⁴ – ein im Nachgang ernüchterndes Ergebnis. Bezüglich der Tragfähigkeit der Walzen ließ sich jedoch festhalten, dass sich selbst bei den drei- bis vierfachen der praxisüblichen Auflagerdrücke keine Anzeichen für eine Gefährdung der Sicherheit des Lagers ergaben – außer den schon bei geringen Belastungen wahrnehmbaren plastischen Formänderungen der Platten und Rollen [90/S.58]. Nach Kenntnis des Verfassers ist die Versuchsreihe des VDI nie zum Abschluss gebracht worden.

Aus heutiger Sicht stellt sich die Frage, warum in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts – einer Blütezeit des Eisenbahnbaus und damit auch des Brückenbaus – die Brückenlager als Gesamtgefüge experimentell nicht untersucht wurden. Eine mögliche Antwort ist im ingenieurwissenschaftlichen Umfeld dieser Zeit zu suchen, hier insbesondere in der Verwissenschaftlichung der Technik in den 1860er- und 1870er-Jahren¹⁹⁵ – eine Bewegung, die zu einem „[...] wachsenden Widerspruch zwischen Theorie und Praxis führte“, wie BACH 1889 rückblickend feststellte [286/S.452]. Da sich jedoch drängende aktuelle Fragestellungen der Praxis, wie zum Beispiel das Berührungsproblem der Lagerwalzen, einer naturwissenschaftlich begründeten und schlüssigen mathematischen Beschreibung entzogen, war ein methodischer Wechsel erforderlich geworden, den BACH wie folgt kommentierte:

¹⁹⁴ Siehe dazu in [90/S.58], [57/S.59].

¹⁹⁵ Zur methodischen Auseinandersetzung im Ingenieurbauwesen siehe in [496],[525],[575].

„In neuerer Zeit hat sich eine andere Richtung mehr und mehr Geltung zu schaffen gewusst, eine Richtung, welche zwar auch die Gesetzmäßigkeit der Vorgänge zu ergründen und in das Gewand der Mathematik zu kleiden sucht, welche doch bestrebt ist, dies erst dann zu thun, nachdem sie durch den Versuch die Erfahrungsgrundlagen für die Rechnungen nach Möglichkeit sichergestellt hat; welche es ablehnt, die gefundenen Ergebnisse zu verallgemeinern, so lange das vorliegende Versuchsmaterial hierzu ungenügend erscheint, und welche einen Hauptwert auf die lebendige Anschauung von den thatsächlichen Vorgängen legt. Es lässt sich diese Richtung, die zweifellos dem eigentlichen Wesen und dem Ziele der Technik näher steht, als diejenige kennzeichnen, welche überall da, wo unsere derzeitigen Kenntnisse und die Überlegung [...] nicht ausreichen, in erster Linie die Fragestellung an die Natur kultiviert“ [286/S.452].

Ein derartiges Umdenken im ausgehenden 19. Jahrhundert wies dem Versuch für die Erkenntnisgewinnung wieder stärkere Bedeutung zu. Und nachdem an den technischen Bildungseinrichtungen seit der Jahrhundertmitte im Ringen um eine von der Universität gesetzte Norm von „Wissenschaftlichkeit“ die Empirie sorgfältig zurückgedrängt worden war [542/S.292], musste sich nun auch der Lehrbetrieb den veränderten Bedingungen anpassen. Die Notwendigkeit experimenteller Lehre und Forschung führte zur Einrichtung technischer Laboratorien und Prüfanstalten an den technischen Hochschulen, um theoretische Grundlagen durch Versuche und Messungen ergänzen zu können. In diesen Kontext gehört die Ende der 1880er-Jahre einsetzende und erläuterte Versuchstätigkeit zum Berührungsproblem an Brückenlagern. Unter dem Einfluss BACHS wurde 1884 die Materialprüfanstalt in Stuttgart gegründet, TETMAJER war mit der Leitung der 1880 am Züricher Polytechnikum eingerichteten Versuchsanstalt betraut, die JUSELIUS für seine Experimente nutzte. Die Versuche des VDI fanden in der 1871 gegründeten Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt in Charlottenburg statt, der heutigen Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Hatte im 19. Jahrhundert vornehmlich der Brückenbau die Fragestellungen zum Berührungsproblem diktiert, so verlagerte sich ab der Jahrhundertwende der Forschungsbedarf zunehmend in den Maschinenbau, insbesondere für die Klärung von Detailfragen der Kugellagertechnik (vgl. Tab. 23). Damit veränderte sich gleichzeitig der Blickwinkel der Ingenieure auf das Berührungsproblem. War es beim „statischen“ Brückenlager noch um den Abtrag hoher Lasten bei vernachlässigbarer Beweglichkeit gegangen, so erforderten die „dynamischen“ Kugellager des Maschinenbaus bei geringerer Belastung teilweise eine extreme Schnellläufigkeit. Obwohl sich die Wälzlagertechnik des Maschinenbaus kaum noch mit der des Brückenbaus vergleichen ließ, ergaben sich aus den im frühen 20. Jahrhundert zum

Berührungsproblem im Maschinenbau durchgeführten Versuchen interessante Erkenntnisse für die existierende Brückenlagertechnik. Hier seien insbesondere die Versuche FÖPPLS¹⁹⁶ genannt, der 1936 nachweisen konnte, dass entgegen der bis dato üblichen Annahme die Zerstörung der Walzen nicht an der Oberfläche, sondern von innen heraus beginnt (K1- 24). Er bezog sich dabei auf Experimente von THUM/WUNDERLICH (K1- 23), die das Ansteigen der Fließgrenze bei behinderter Formänderung untersuchten und mit dem Bestreben der Werkstoffe, in Schichten oder „quantenhaft“ zu fließen, begründeten¹⁹⁷. Die Ermittlung der Fließspannung war für das Berührungsproblem insofern interessant, da diese die beginnende Zerstörung der Walzen ankündigte und auf Grund der bleibenden Verformungen im direkten Zusammenhang mit dem Gebrauchswert des gesamten Brückenlagers stand (Abb. 89).

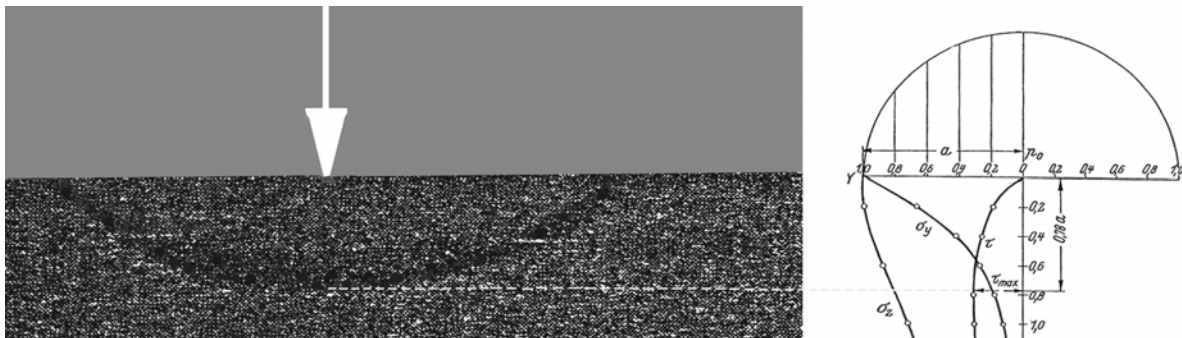


Abb. 89: Links: Die durch Ätzung sichtbare Fließlinie kennzeichnet das erste Werkstoffversagen, das entsprechend der Spannungsverteilung im Halbraum (rechts) im Abstand von $0,78 a$ von der Oberfläche erfolgt; [306]

Die messtechnische Bestimmung der Verformungen selbst war problematisch, insbesondere bei kleinen Versuchskörpern. Nicht umsonst bildeten nach der Jahrhundertwende Untersuchungen zur Messtechnik einen eigenen Schwerpunkt innerhalb der Versuche zum Berührungsproblem – vgl. Tab. 23. Weil die Genauigkeit der schon vor 1900 veranlassten Untersuchungen insgesamt unbefriedigend und die messtechnischen Untersuchungen von LAFAY um 1901 offenbar fehlerbehaftet geblieben waren, forderte KOLLMAR 1919 Versuche zu „[...] genaueren Messungen mit großen Probekörpern bei kleinen und größeren Lasten“ ein, da „[...] man über die Größe der auftretenden Größtspannungen noch vollkommen im unklaren ist“ [57/S.60]. Solche wurden auf Veranlassung der Technischen Kommission des Verban-

¹⁹⁶ LUDWIG FÖPPL (1887-1976).

¹⁹⁷ Diese Versagensform ist u.a. vergleichbar mit dem Grundbruchproblem der Bodenmechanik. Auch dort verhindert der räumliche Spannungszustand ein örtlich eingegrenztes Versagen, bis sich bei Überschreiten einer Grenzlast ein schichtenhaftes Versagen einstellt.

des Schweizerischer Brückenbauanstalten in den Jahren 1921 bis 1923 in der Materialprüfanstalt von Lausanne von DUMAS¹⁹⁸ durchgeführt (K1- 21). An vergleichsweise großen Kugeln – ca. 15 cm - und Belastungen bis 5000 kg war die verformte Berührungsfläche einfacher zu messen. Seine Versuchsergebnisse ließen einen Zusammenhang zwischen der leicht zu ermittelnden Brinellhärte und der Fließspannung erkennen. Daraus leitete BLEICH¹⁹⁹ eine Empfehlung für einen „zulässigen größten Berührungsdruck“ ab (vgl. K2- 26) – ein Ansatz, der jedoch keinen praktischen Nutzen bei der Bemessung mehr bringen sollte.

6.1.4 Anwendbarkeit vs. Gültigkeit

Vor einer abschließenden Wertung aller historischen Ansätze soll eine Zusammenstellung wichtiger Erkenntnisse aus den Versuchen eine prinzipielle Aussage über die Gültigkeit der HERTZ'schen Gleichungen für den Anwendungsfall „Brückenlager“ ermöglichen.

Tab. 24: Erkenntnisse der Versuche in Bezug auf die Theorie nach HERTZ

Jahr	Name	Erkenntnisse bezüglich HERTZ
1881	Hertz	fand seine Theorie durch Versuche mit Glas bestätigt
1891	Auerbach	erhielt mit spröden Körpern (Glaskugeln) Übereinstimmungen, aber auch Abweichungen von der HERTZ'schen Theorie [285/S.91]
1899	Stribeck	wies an gehärteten Gussstahlkugeln bei kleineren Belastungen eine fast vollständige Übereinstimmung zwischen HERTZ'scher Theorie und Versuch nach [92/S.7], stellte selbst nach beträchtlicher Überschreitung der Proportionalitätsgrenze keine erheblichen Unterschiede fest [92/S.12]
1899	Rasch	Versuche an gehärteten Gussstahlkugeln: „Man kann sich des Bedauerns nicht erwehren, dass sich die bewunderungswürdig tiefe Hertz'sche Arbeit auf [für die Praxis, A.d.Verf.] hinfalligen Voraussetzungen aufbaut“ [78/S.320].
1901	Lafay	konnte die HERTZ'sche Theorie nicht bestätigen (Versuche vermutl. jedoch fehlerhaft) [13/S.6]
1912	Rasch	Versuche an gehärteten Gussstahlkugeln: Die HERTZ'schen Gleichungen „[...] führen zu einer konstruktiven Unterschätzung und Unterwertung von Kugel- und Rollenlagern und können für die Berechnung dieser wichtigen Konstruktionsglieder nicht in Frage kommen“ [79/S.2].
1923	Dumas	Versuche an großen gehärteten Gussstahlkugeln zeigten bei Belastungen unterhalb der Proportionalitätsgrenze gute Übereinstimmung mit HERTZ [128//S.562]
1927	Bochmann	Versuche an Stahlkugeln zeigten, dass HERTZ'sche Formeln zur Berechnung der Abplattung auch innerhalb der Proportionalitätsgrenze nicht vollkommen exakt sind [13/S.27]
1936	Föppl	Versuche mit Walze (St60) und Platte (St37) ergaben im rein elastischen Bereich sehr gute Übereinstimmung mit HERTZ [306/S.216]

¹⁹⁸ ANTOINE DUMAS (dem Verfasser sind keine Lebensdaten bekannt).

¹⁹⁹ FRIEDRICH BLEICH (1878-1950).

Berücksichtigt man den von HERTZ definierten Gültigkeitsbereich seiner Theorie, wonach die Formeln neben einigen anderen Bedingungen nur – und nur dann – Gültigkeit besitzen, solange an der Berührungsstelle die Proportionalitätsgrenze nicht überschritten wird, so muss man den Ansatz von HERTZ als prinzipiell gültig anerkennen. Zumindest ergaben viele Versuche für den rein elastischen Bereich eine gute oder sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Versuch.

Mangels wissenschaftlich begründeter Alternativen für eine elastisch–plastische Beschreibung des Berührungsproblems jedoch wurde das HERTZ'sche Formelwerk auch außerhalb seines Gültigkeitsbereiches für praktische Anwendungen empfohlen, wie etwa 1894 von WEYRAUCH für die Bemessung der Walzen von Brückenlagern [105/S.140]. Dieser wusste, dass sich unter praktischen Randbedingungen bleibende Formveränderungen an den Berührungspunkten nicht vermeiden lassen [105/S.141]. Für den konkreten Gebrauch der HERTZ'schen Gleichungen zur Bemessung von Brückenlagern stellt sich also mehr die Frage nach der Anwendbarkeit und weniger nach der Gültigkeit, lag der Anwendungsfall „Brückenlager“ doch jenseits des definierten Gültigkeitsbereiches. RASCH²⁰⁰ resümierte nach seinen Versuchen 1899, wonach die „[...] Hertz'sche Arbeit auf [für die Praxis, A.d.Verf.] hinfalligen Voraussetzungen aufbaut“ [78/S.320]. Auch die Anwendbarkeit lehnte er 1912 nach Auswertung weiterer Versuche wegen „[...] einer konstruktiven Unterschätzung und Unterwertung von Kugel- und Rollenlagern [...]“ [79/S.2] ab – seinerzeit eine Wertung offenbar aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Für die heutige Beurteilung der Lager bleibt hingegen festzuhalten, dass RASCH mit seiner Einschätzung der Bemessung nach HERTZ den Status einer „Bemessung auf der sicheren Seite“ verlieh.

Betrachtet man die Versuche zur HERTZ'schen Theorie bis zur Jahrhundertwende, fällt auf, dass diese vornehmlich auf Versuchen mit sprödem Glas oder gehärteten Gussstahlkugeln basierten, der HERTZ'sche Ansatz also noch nicht bezüglich des für Brückenlager relevanten Berührungsfalls „Walze/Platte“ und der im Brückenbau üblichen Materialien untersucht worden war. Dass die Werkstoffeigenschaften aber einen wesentlichen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse haben können, zeigten die ganz unterschiedlichen Erkenntnisse von BACH (mit Blei) und JUSELIUS (mit Eisen, Stahl) zur Verteilung der Verformungen im Kontaktbereich. Auch vor diesem Hintergrund war die Anregung VIANELLOS zu ausgeprägten Versuchen mit Brückenlagern nach der Jahrhundertwende gerechtfertigt.

²⁰⁰ EWALD FERDINAND WILHELM RASCH (1871-1927).

6.1.5 Wertung

Nachfolgende Tab. 25 fasst die zu den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern entwickelten Bemessungsansätze zusammen und basiert im Wesentlichen auf Tab. 21 von S.131. Diese wurde jedoch fortgeschrieben und ergänzt durch

- die anfänglichen Dimensionierungsempfehlungen von WERDER und SCHWEDLER,
- die Versuche von BALDERMANN und DESLANDRES zum Berührungsproblem,
- die theoretischen Bemessungsansätze für die in Tab. 22 auf S.134 zusammengeführten empfohlenen bzw. zulässigen HERTZ'schen Pressungen.

Tab. 25: Zusammenfassende Übersicht der zu den gusseisernen und stählernen Brückenlagern entwickelten Bemessungsansätze. Dargestellt wird die erforderliche Walzengeometrie (Anzahl n , Länge l , Radius r) in Abhängigkeit von der Auflast A (Auflast in t, Länge und Radius in cm). In der Tabelle gibt „Aus“ jeweils an, ob der Bemessungsansatz aus einer Faustformel (F), Versuchen (V) oder durch Bezug auf den HERTZ'schen Bemessungsansatz (H) abgeleitet worden war.

		Gusseisen		Gussstahl/Stahlguss		Schweiß-/Flusseisen		Schmiedestahl	
		$n \cdot l \cdot r =$		$n \cdot l \cdot r =$		$n \cdot l \cdot r =$		$n \cdot l \cdot r =$	
		$x \cdot A$	Aus	$x \cdot A$	Aus	$x \cdot A$	Aus	$x \cdot A$	Aus
1859	Werder	83,5 A	F	-		-		-	
1861	Schwedler	64,5 A	F	-		-		-	
1869	Köpke	48 A	F	13...18 A	F	-		-	
1869	Fränkel	21...25 A	F	14...16,5 A	F	-		-	
1870	Baldermann	10...17 A	V	-		-		-	
1875	Winkler	10...19,5 A	F	8...15,5 A	F	10...19,5 A	F	-	
1876	Baentsch	57 A	F	26 A	F	81 A	F	-	
1876	Laissle/Schuebler	16...25 A	F	-		-		-	
1882	Steiner	15 A	F	12 A	F	-		-	
1888	Haeseler	16,5...23 A	F	18 A	F	-		-	
1889	Reuleaux	27,5...33,5 A	F	10...13 A	F	34,5...41,5 A	F	-	
1889	Tetmajer	16,5 A	F	8 A	F	12,5...16,5 A	F	-	
1889	Bach	20 A	V	9 A	V	-		-	
1893	Deslandres	22,5 A	V	28 A	V	-		-	
1894	Weyrauch	20...45 A	H	17...44 A	H	42...94 A	H	-	
1900	Kübler/Cauer	-		-		10,5 A	H	-	
1905	Tetmajer	25 A	V	25...36 A	V	15 A	V	-	
1905	Vianello	10 A	F	10 A	F	-		-	
1908	Schaper	11...14,5 A	H	9...11 A	H	15,5...19 A	H	-	
1911	Bernhard	11...20 A	H	8...14,5 A	H	-		-	
1914	Kollmar	-		11 A	H	-		-	
1922	Schaper	11...20 A	H	9,5...13 A	H	15,5...24 A	H	7...9,5 A	H
1922	B.E. (vorl. Fassg.)	wie Schaper 1922							

1923	Reichsminist.	7...11 A	H	5,5...12,5 A	H	9...12,5 A	H	4,5...5,5 A	H
1925	B.E. (1.Ausg.) LF H	wie Reichsminister 1923							
1931	DIN 1073	wie Reichsminister 1923							
1937	DIN 1050	wie Reichsminister 1923							
1990	DIN 18 800-1	7...8 A	H	5,5...6,5 A	H	9...10,5 A	H	6...7 A	H

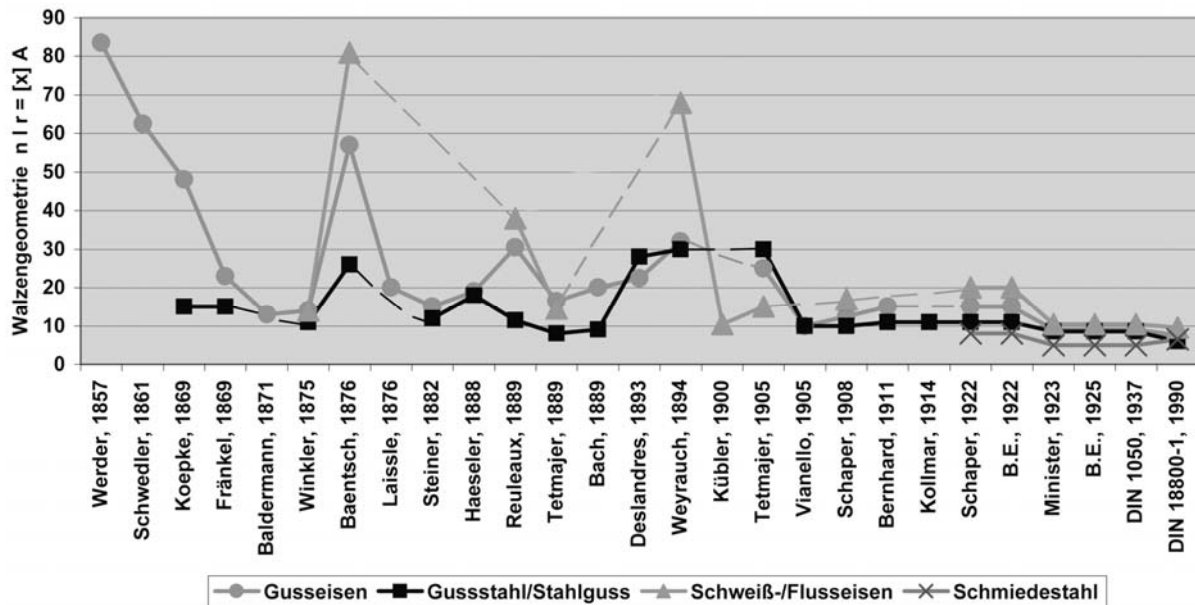


Abb. 90: Graphische Darstellung der Zusammenfassung in Tab. 25. Da nicht von jedem Autor Angaben zu allen Materialien vorlagen, wurden die in diesem Fall unterbrochenen Graphen durch gestrichelte Linien geschlossen.

Eine abschließende Wertung der Bemessungsansätze muss die rasante metallurgische Entwicklung – insbesondere im 19. Jahrhundert – berücksichtigen, die sich in den jeweiligen Forderungen selbstverständlich widerspiegelte. Die direkte Vergleichbarkeit der Materialien und damit der Bemessungsansätze nimmt demnach mit zunehmendem zeitlichen Abstand ab. Der rein qualitative Charakter der Gegenüberstellung sei damit betont. Darüber hinaus sei auf den unklaren Gebrauch der Begrifflichkeiten zum Material verwiesen – vgl. dazu Abschnitt 5.4.1. Die jeweiligen Angaben waren also stark vom Materialverständnis der Autoren abhängig.

Ungeachtet dieser Unschärfen stellt die Wende zum 20. Jahrhundert eine Zäsur in der „Entwicklungslinie“ zum Berührungsproblem dar. Fortan konnte sich die Brückenlagerbemessung auf die HERTZ’schen Formeln stützen. Die Zeit bis zur Zäsur, die Jahre der „Faustformeln“ – gleichzeitig Boomjahre des Eisenbahnbaus in Deutschland – fassten Zeitgenossen bereits treffend zusammen. So schrieb WEYRAUCH 1894 im Zuge seiner Empfehlungen der HERTZ’schen Gleichungen:

„Angesichts solcher Verschiedenheiten in den Annahmen hervorragender Fachmänner dürfte der Schluss nicht ungerechtfertigt sein, dass die bisherige Berechnung der Brückenaufleger einer wissenschaftlichen Grundlage überhaupt entbehrt. Die Auflager haben gehalten – das ist das einzige, was für sie spricht“ [105/S.135].

CAUER ergänzte 1900 etwas pointiert zum Stand der Lagerbemessung, wonach man

„[...] über die Beanspruchungen, die man Rollen oder Pendeln zumuten kann, sich durchaus im Unklaren ist und daher unter ängstlichem Hin- und Hertappen die Anzahl der Rollen oder Pendel nach sehr verschiedenen Grundsätzen, im allgemeinen aber wohl zu reichlich bemessen hat“ [16/S.918].

Die abschließende quantitative Bewertung der herkömmlichen „Faustformeln“ gab schon einen Ausblick auf die sich langsam etablierende Bemessung nach HERTZ, die im Laufe des 20. Jahrhunderts bei vergleichbaren Randbedingungen geringere Walzendimensionen zulassen sollte.

Spätestens nach 1905 hatte sich das Feld „beruhigt“. Ursachen dafür waren neben der zunehmenden Erfahrung und Sicherheit beim Gebrauch der HERTZ'schen Gleichungen auch die inzwischen zuverlässige Herstellung von hochwertigem Lagermaterial sowie die klaren statischen Verhältnisse bei Einrollen- oder Zweirollenlagern, die sich im frühen 20. Jahrhundert im Brückenbau durchsetzten.

Für die heutige statisch-konstruktive Einschätzung historischer Brückenlager ergeben sich aus dem qualitativen Vergleich in Abb. 90 Traglastreserven für den noch existierenden Lagerbestand. Allein aus der Tatsache, dass das Streckennetz in Deutschland bis zum Ausbruch des Ersten Weltkrieges und damit bis zur Festlegung des noch heute gültigen Bemessungswerts von 1923 (Tab. 25) weitgehend errichtet worden war, lassen sich mit zunehmendem Alter der Lager unter Umständen sogar beachtliche Tragreserven ableiten.

Aus heutiger Sicht begünstigend wirkt auch die Tatsache, dass die Ablösung bewährter Ingenieurpraxis durch neue Ansätze erfahrungsgemäß ca. eine Ingenieurgeneration beansprucht. Diese Trägheit wirkte auch bei der Behandlung des Berührungsproblems. Wegen der daraus resultierenden Phasenverschiebung zwischen Theorie und Praxis fand zum Beispiel WINKLERS weit verbreiteter Ansatz von 1875 noch in den 1920er-Jahren Anwendung [128/S.557]. Die in dieser Zeit noch praktizierte Bemessungspraxis wird im Taschenbuch „Eisen im Hochbau“ 1923 eindrucksvoll vermittelt: „Größtenteils werden Rollen aus Flußstahlguß verwendet, deren Durchmesser nach der in der Praxis gebräuchlichen Formel

$$d \geq \frac{A}{50 \cdot n \cdot l} \text{ bestimmt wird“ [568/S.535]. (A [kg], d und l [cm])$$

Das war weiterhin eine Faustformel, welche – der Form in Tab. 25 angepasst – der VIANELLO-Formel ($n/r \geq 10 A$) entspricht. Der theoretische Bemessungsansatz nach HERTZ hatte es demnach nicht einfach, in die Praxis integriert zu werden. Noch in den 1930er-Jahren wird im Zusammenhang mit der Erarbeitung von Normblattentwürfen über „[...] schwer überbrückbare Meinungsverschiedenheiten bezüglich der Berechnungsweise“ [468/S.1] berichtet. Es ist zu vermuten, dass die Lager einer Vielzahl der bis in die Zwischenkriegszeit hinein errichteten Brücken noch mit den herkömmlichen Faustformeln bemessen worden sind. Aus diesen Überlegungen heraus könnte sich heute – ca. ein Jahrhundert später – bei einer Neubemessung vorhandener Lagerwalzen mittels HERTZ'scher Gleichungen etwas Spielraum ergeben, um gegebenenfalls gestiegene Verkehrslasten nachweisen zu können.

6.1.6 Zusammenfassung

Seit Einführung von Lagersätteln auf den Pylonen der Hängebrücken existierte schon im frühen 19. Jahrhundert die Frage nach der Belastbarkeit der Lagerwalzen, die aber noch auf empirischem Wege beantwortet werden konnte. Erst die veränderten Randbedingungen nach der Jahrhundertmitte führten zu einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der Tragfähigkeit von Brückenlagern. Zum einen ermöglichte die sich etablierende Kipplagertechnik aus statisch-konstruktiver Sicht eine verlässliche Abschätzung des Lastflusses. Zum anderen erlaubte die entstehende Verflechtung von Theorie und Praxis zunehmend eine theoretische Behandlung statisch-konstruktiver Fragen des Brückenbaus – so auch des Berührungsproblems bei Brückenlagern, welches sich im Kontaktbereich der Walzen mit den Lagerplatten ergab.

Beginnend in den 1860er-Jahren erschienen bis ins frühe 20. Jahrhundert hinein diverse Formeln, die einer fundierten Grundlage jedoch noch mehr oder weniger entbehrten. Erst mit den Gleichungen des Physikers HERTZ konnte sich im 20. Jahrhundert allmählich ein streng wissenschaftlicher Bemessungsansatz durchsetzen. Wenngleich die Eignung bzw. der Nutzwert der HERTZ'schen Formeln für die praktische Bemessung von Lagern früh angezweifelt wurde, bilden diese bis heute die wissenschaftliche Grundlage bei der Behandlung des Berührungsproblems.

Gegenüber der Vielzahl theoretischer Bemessungsansätze gab es vergleichsweise wenige praktische Versuche zum Berührungsproblem im Brückenbau. Im Kontext der methodischen Auseinandersetzung innerhalb der Ingenieurwissenschaften galten sie lange Zeit als unwissenschaftlich. Erst die Gegenbewegung hin zur praktischen Verwertbarkeit gewonnener Erkenntnisse und die damit einhergehende Etablierung von Materialprüfanstalten schafften das Umfeld für versuchstechnische Untersuchungen. Seit der Wende zum 20. Jahrhundert wurden dabei jedoch immer öfter Problembereiche jenseits der Brückenlagertechnik thema-

tisiert, insbesondere aus dem Maschinenbau. Das spiegelt die volkswirtschaftliche Situation wider, denn bis zum Ersten Weltkrieg wurden die Aufgabenstellungen vor allem im Spannungsfeld der Hochrüstung benannt. Der Brückenbau in Eisen hingegen spürte zur Jahrhundertwende bereits deutlich die zunehmende Konkurrenz aus der sich entwickelnden Eisenbetonbauweise, insbesondere für kleinere und mittlere Spannweiten. Vor diesem Hintergrund ging die wirtschaftliche Notwendigkeit für eine weitere Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlagergeneration verloren – ein Umfeld, indem die 1901 initiierten Versuche des VDI letztlich scheitern mussten.

Erst der empirische Langzeitversuch – die jahrzehntelange Nutzung mittels HERTZ' dimensionierter Brückenlager bis hinein ins 21. Jahrhundert – sollte die grundsätzliche Eignung dieser Theorie für den Anwendungsfall „Brückenlager“ im Nachhinein belegen. Die seinerzeit noch bemängelte Unwirtschaftlichkeit der HERTZ'schen Gleichungen sicherte dabei die Reserven, um der Verkehrsentwicklung des 20. Jahrhunderts – vielleicht auch der des 21. Jahrhunderts – genügen zu können.

6.2 Das Reibungsproblem

Neben dem Berührungsproblem bestimmte dasjenige der Reibung maßgeblich die Entwicklung der gusseisernen und stählernen Brückenlager. Beide standen in direkter Abhängigkeit, durften doch die im Kontaktbereich minimierter Lagerkörper auftretenden Verformungen die Beweglichkeit der verbundenen Lagerteile nicht signifikant einschränken. Diese durch die Wirkungsweise der Brückenlager geforderte Kinematik führte zu einer funktionalen Nähe der Lager zum Maschinenbau und unterschied das Brückenlager von gewöhnlichen Bauteilen des Hoch-, Tief-, aber auch des Brückenbaus, wo Bauteile üblicherweise statisch miteinander verbunden werden.

Reibung als Begriff bezeichnet dabei einen physikalischen Widerstand gegen eine Bewegung, bestehend aus den beiden Komponenten Ruhereibung und Gleitreibung [355/S.2f]. Reibung tritt in historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern in vielfältiger Form auf. Diese Arbeit thematisiert als Reibungsproblem die in den Dilatationsvorrichtungen horizontal beweglicher Lager auftretende Gleit- und Wälzreibung. Sie begrenzt sich auf für historische gusseiserne und stählerne Brückenlager relevante Fragestellungen. Versuche zu modernen PTFE-Lagern, Lagern des Maschinenbaus o.ä. bleiben demnach unberücksichtigt.

6.2.1 Anfänge

Die Auseinandersetzung mit den Erscheinungsformen der Reibung hat eine lange Geschichte. Schon den Erbauern der Clapper-Brücke in Süd-West-England wird bewusst gewesen sein, dass das Gewicht der Brücke selbst bei hohen Wasserständen ein Fortspülen des Bauwerks verhindern wird (Abb. 91)²⁰¹. Zudem wurde der Kraft sparende Transport großer Lasten auf Rundhölzern vermutlich seit Jahrtausenden genutzt. Die Kenntnis der Vorteile dieser Bewegungsart gegenüber einer gleitenden Bewegung jedoch gehörte bis ins 18. Jahrhundert nicht zum allgemeinen Wissensstand. LEUPOLD zum Beispiel empfahl noch 1725 den Schlitten zum Transport großer, schwerer Lasten [331/S.110].



Abb. 91: Clapper Bridge in Postbridge, Süd-West-England; Links: Ansicht, Rechts: Mittelpfeiler; [670]

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit Reibungsvorgängen begann im ausgehenden 15. Jahrhundert. Demnach konnte sich die Auseinandersetzung mit diesem Problem bei Brücken im frühen 19. Jahrhundert bereits auf einen Erkenntnisstand berufen, der etwa in folgenden Entwicklungsschritten tabellarisch darstellbar ist:

Tab. 26: Zusammenstellung früher Versuche zur Gleit- und Wälzreibung

Jahr	Name	Erkenntnis	Literatur
GLEITREIBUNG			
1450-1500	da Vinci, L.	Reibung steigt proportional mit aufgebracht Belastung	[289/S.197]
1518 [554]		Reibungskraft unabhängig von der scheinbaren Berührungsfläche, Reibung 1/4 der Anpresskraft	[290/S.101f] [355/S.39]
1699	Amonton, G.	im Wesentlichen Bestätigung der Erkenntnisse da Vincis Reibung unabhängig von der Ausdehnung der Fläche Reibungswiderstand entspricht ungefähr 1/3 der Belastung Reibung unabhängig von Geschwindigkeit	[355/S.4f] [289/S.197] [290/S.106f] [291/S.107] [313/S.490]

²⁰¹ Über das Alter der Clapper Bridge finden sich ganz unterschiedliche Angaben. In [521/S.16] wird die Erbauung in die Bronzezeit – also etwa 2000-1000 v.Chr. – datiert.

um 1700	de la Hire, Ph.	bestätigte die Erkenntnis, dass Reibungskraft unabhängig von der Berührungsfläche existiert	[355/S.5f]
ab 1700	Parent, A.	Versuch, den von Amontons ermittelten Reibungsbeiwert von $1/3$ theoretisch zu begründen; Versuche auf geneigten Ebenen führten zur Einführung des Begriffes „Gleichgewichtswinkel“ Erkenntnis, dass weder Fläche noch Geschwindigkeit Einfluss auf Reibung haben	[355/S.6]
um 1725	Leupold, J.	erste Arbeit zur Reibung in deutscher Sprache Einflüsse der Oberflächenrauheit und –geometrie auf die Reibung: je rauer und ungleicher die Flächen, je größer die Reibung, Hinweise zur Verminderung der Reibung, wie Gebrauch glatter Oberflächen und harter Werkstoffe, optimale konstruktive Gestaltung sowie Schmierung der Reibpartner empfohlen	[289/S.197] [331/S.98ff] [355/S.10]
1758	Segner, J.A. v.	Mit der Geschwindigkeit steigt auch die Reibung, führt die Begriffe „Ruhreibung“ und „Bewegungsreibung“ ein	[312/S.259] [355/S.8]
um 1760	Euler, L.	eindeutige analytische Erfassung der Reibung Einführung des Symbols „ μ “ als Reibungszahl Unterscheidung zwischen statischer und kinetischer Reibung Reibung nimmt proportional mit Geschwindigkeit und Auflast zu Reibungswiderstand entspricht ungefähr $1/3$ der Belastung	[290/S.107f] [291/S.107] [354/S.166] [355/S.7]
um 1779 nach [310] um 1785 nach [291]	Coulomb, Ch. A.	Bestätigung der Erkenntnisse von da Vinci und Amontons Gleitreibung größer als Wälzreibung statische Reibung größer als kinetische (dynamische) Reibung innerhalb der Versuchsgrenzen kein Einfluss der Geschwindigkeit auf die Reibungskoeffizienten beschreibt die Reibung als Größe, die von der Werkstoffpaarung und der Oberflächenbeschaffenheit abhängt	[290/S.109f] [299/S.247ff] [310/S.205] [313/S.490ff] [339/S.146] [337/S.171] [355/S.39ff]
um 1784	Vince, S.	Reibung harter Körper in Bewegung ist gleichmäßig verzögernde Kraft Reibung nimmt proportional geringer zu als die Auflast Reibung variiert mit der Flächenausdehnung („smallest surface will have the least friction“ Unterschiede im Reibungsverhalten harter / weicher (Wolle) Stoffe	[337/S.172] [339/S.147] [354/S.165ff] [354/S.175]
um 1800	Rondelet, J.-B.	je rauer die Oberfläche, desto größer die Reibung je größer die Auflast, desto größer die Reibung, variiert zwischen $1/2 \dots 1/3$ der Auflast, Ausdehnung der Oberfläche ohne Einfluss	[339/S.148]
um 1825	Rennie, G.	geschmierte Reibung = ca. $1/3$ der trockenen Reibung veröffentlicht Reibungszahlen für trockene Reibung Reibung direkt abhängig von Auflast, ohne Einfluss von Oberfläche, Zeit oder Geschwindigkeit, zog erstmalig die Abnutzung der Reibflächen in Betracht	[290/S.111f] [337/S.171ff] [339/S.149ff] [355/S.47] [356/S.160]
1831-1833	Morin, A.-J.	Reibung direkt proportional abhängig von der Auflast und völlig unabhängig von der Ausdehnung der Kontaktfläche Reibung unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit	[289/S.197] [292/S.230ff] [337/S.171ff]
1851	Poirée, J.	Reibung sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit	[310/S.208] [314/S.73]
1856	Bochet, H.	Reibung sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit	[310/S.210f]
1876	Jenkin, Fl. Ewing, J.A.	Reibungskoeffizient von der Geschwindigkeit abhängig stetiger Übergang von der kinetischen in die statische Reibung	[310/S.214f]

1876	Kimball, A.S.	Erklärung der voneinander abweichenden Resultate bzgl. des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Reibung	[310/S.215] [322] [323/S.353ff]
1878-1879	Galton, D.	Bestätigung der Ergebnisse von Poirée Reibung sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit Abnahme des Reibungskoeffizienten mit der Zeit Reibungskoeffizient von Material und Wetter abhängig Bremseffekt blockierter und gleitender Räder schlechter als der gebremster, aber noch rotierender Räder	[300/S.19f] [310/S.211f] [311/S.171ff] [314/S.73]

WÄLZREIBUNG

um 1680	Hooke, R.	entdeckte die Einflüsse von Deformation und Adhäsion	[290/S.105f]
um 1725	Leupold, J.	Walze auf Grund der größeren Fläche besser als Wagenräder, favorisiert aber den Schlitten zum Bewegen großer Lasten	[331/S.110]
um 1779	Coulomb, Ch. A.	Widerstand proportional zum Gewicht und umgekehrt proportional zum Zylinderradius, Wälzreibung geringer als Gleitreibung für $d=4''$ Holzzylinder Reibung ca. 1/100 der Auflast	[47/S.11] [140/S.364] [292/S.74ff]
1831-1833	Morin, A.-J.	Widerstand proportional zur Belastung und umgekehrt proportional zum Wälzkörperradius	[47/S.11] [290/S.114f]
1839	Dupuit, A.J.E.J.	wie Morin, aber Abhängigkeit von der Quadratwurzel des Wälzkörperradius	[47/S.11] [290/S.115f]
vermutlich um 1840	Babbage, Ch.	bei hölzernen Walzen ($d=3''$) Reibung nur 1/20 im Vergleich zur Gleitreibung	[140/S.364]
1875	Osborne, R.	Wesen des Schlupfes als eine Ursache des Wälzwiderstandes erklärt, Rollwiderstand mit einem teilweisen Schlüpfen verbunden	[47/S.11] [307/S.5] [341/S.173ff]

Ein umfassender Überblick zu den frühen Reibungsversuchen ergibt sich aus [292] und [355]

Die hier aufgeführten Versuche thematisierten neben grundsätzlichen Untersuchungen zum Wesen der Reibung auch ganz praktische Fragestellungen, die sich im Zuge der Industrialisierung häufig ergaben. War es anfangs vornehmlich das Ziel gewesen, einmal erzeugte Energie möglichst verlustarm nutzen zu können, Reibung also möglichst zu reduzieren, so ging es spätestens mit dem sich entwickelnden Eisenbahnwesen im 19. Jahrhundert auch darum, Reibungsvorgänge vorteilhaft einzusetzen, zum Beispiel beim effektiven Abbremsen von Eisenbahnzügen²⁰². Für die Mitte des 19. Jahrhunderts, der beginnenden Anwendung der gusseisernen und stählernen Brückenlager, lässt sich aus Tab. 26 folgender Erkenntnisstand zusammenfassen:

²⁰² Diesbezügliche Versuche nutzten schließlich die Praxisnähe von Feldversuchen gegenüber den räumlich eingeschränkten Möglichkeiten im Labor [336], [310/S.207].

Gleitreibung:

- Die Reibungskraft ist proportional zur Normalkraft mit der Reibungszahl als Proportionalitätsfaktor, der von der Werkstoffpaarung und der Oberflächenbeschaffenheit abhängt.
- Die Reibungskraft ist unabhängig von der Berührungsfläche.
- Die Intensität der Reibung kann durch Schmierung verringert werden.
- Gleiten ungleiche Körper übereinander, wird das Maß der Reibung durch die Eigenschaften des weicheren Körpers bestimmt.
- Reibungskoeffizienten für wichtige Werkstoffpaarungen der Praxis sind bekannt.
- Bezüglich der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wurde zwischen statischer und dynamischer Reibung unterschieden (Haftreibung und Bewegungsreibung), letztere kleiner als erstere und unbeeinflusst von der Geschwindigkeit. Nach MORINS Untersuchungen „[...] war der Satz von der Unabhängigkeit der gleitenden Reibung von der Geschwindigkeit fast zu einem Postulat der angewandten Mechanik geworden“ [310/S.206]. Erst in der zweiten Jahrhunderthälfte sollte die Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit durch umfangreiche Versuche geklärt werden²⁰³.

Wälzreibung:

- Die Wälzreibung ist geringer als die Gleitreibung.
- Die Wälzreibung vergrößert sich proportional mit der Auflast, verringert sich jedoch mit zunehmendem Wälzkörperradius. (MORIN und DUPUIT stritten noch, ob der Wälzkörperradius direkt oder als Quadratwurzel in die Berechnung einzufließen hat. [47/S.11])
- Verformungen der Oberfläche beeinflussen die Reibung.

Erst 1875 erklärte REYNOLDS²⁰⁴ die Verwandtschaft von Gleitreibung und Wälzreibung durch den in der Kontaktfläche auftretenden Schlupf, welcher einen Teil des Rollwiderstands ausmacht. Auf Grund dieser Parallele zum Gleiten wählte er den Term „Rolling Friction“ anstatt der allgemeinen Bezeichnung „Resistance to Rolling“ („résistance au roulement“), den COULOMB und die nachfolgenden Verfasser bewusst zur Abgrenzung der Vorgänge beim Rollen von der beim Gleiten auftretenden Reibung gewählt hatten [341/S.156]²⁰⁵.

²⁰³ Siehe dazu in [322],[323].

²⁰⁴ OSBORNE REYNOLDS (1842-1912).

²⁰⁵ Die begrifflichen Differenzierungen sollten sich teilweise sehr lange halten. Noch 1950 eröffnet die *Hütte – Des Ingenieurs Taschenbuch* das Kapitel „Reibung“ mit der Unterscheidung von „Haft- und Gleitreibung“ auf der einen sowie „Rollwiderstand“ auf der anderen Seite. Auf die Erkenntnisse REYNOLDS zur Wesensverwandtschaft wird aber im Textteil verwiesen. Vgl. dazu [637/S.395f].

6.2.2 Frühe Erfahrungen an Brückenlagern

Die Umstände, die zur Einführung von beweglichen Lagern an Brückenbauwerken führten, sind im einführenden Kapitel zur geschichtlichen Entwicklung der Brückenlager beschrieben worden. Demnach konnte man bereits im frühen 19. Jahrhundert – noch vor der Einführung beweglicher Lager an Balkenbrücken – erste Erfahrungen zur Reibung an den Lagersätteln der Hängebrücken sammeln. Das Problem als solches wurde teilweise schon in der Literatur thematisiert, VICAT zum Beispiel schrieb 1830 zu seinen an der Pont Marie d'Argentat ausgeführten Lagersätteln, dass diese „[...] annähernd keine Reibung [...]“ ausübten [260/S.8].

Über die Wirksamkeit dieser ersten Systeme lässt sich aus heutiger Sicht nur spekulieren. Hinweise dazu finden sich nur spärlich in historischer wie auch jüngerer Literatur. Demnach versagten offenbar regelmäßig die an den frühen französischen Drahtkabelbrücken verwendeten hohlen, großen Gusseisenwalzen durch Fehlstellen im Material [554/S.148]. MALBERG²⁰⁶ kritisierte in den späten 1850er-Jahren in seinen *Historisch-kritischen Bemerkungen über Kettenbrücken* die noch unvollkommen ausgeführten Auflagerpunkte bei der von BROWN²⁰⁷ errichteten Union-Bridge und wertete in diesem Zusammenhang das „ausgebildete Walzensystem“ der Menai-Bridge als Verbesserung [198/S.565]. GERSTNER²⁰⁸ lobte 1831 im Zuge seiner Beschreibung der Hammersmith-Kettenbrücke (1824-27), wie akribisch der Planer und für den Bau verantwortliche Ingenieur CLARK²⁰⁹ die Bewegungen der Ketten auf den gusseisernen Rollen der Tragpfeiler untersuchte und später regelmäßig die Auflager der Ketten in den Tragpfeilern inspizierte [313/S.456]. Wie anfällig diese Systeme insgesamt noch waren, zeigte sich unter anderem an den Lagersätteln der sehr viel später errichteten Brooklyn-Bridge (1873-83), wo Verunreinigungen aller Art im Laufe der Zeit geordnete Bewegungen der Wälzkörper praktisch unmöglich machten²¹⁰ (Abb. 92).

²⁰⁶ CARL AUGUST JOSEPH MALBERG (1812-1872).

²⁰⁷ SIR SAMUEL CAPTAIN BROWN (1774-1852).

²⁰⁸ FRANZ JOSEF RITTER VON GERSTNER (1756-1832).

²⁰⁹ WILLIAM TIERNEY CLARK (1783-1852).

²¹⁰ „[...] a series of cylinders lay loose on a bearing plate and invariably filled up with pigeon droppings and aerosol filth. When they moved at all, they canted on the plate and jammed, thus functioning only as immovable bearings over which the cables could not slip to equalize differences in tension“ [554/S.149].

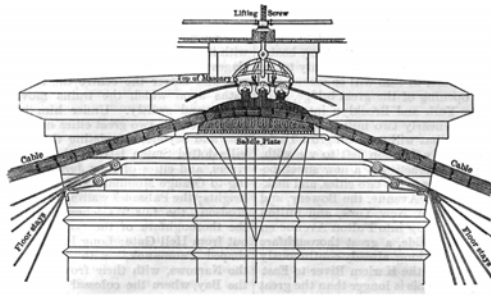


Abb. 92: Brooklyn Bridge; Links: Ansicht, Mitte: Detail des Pylonkopfes [556], Rechts: Detail eines Lagersattels, die verkanteten Walzen sind deutlich sichtbar; [556]

Schon 1929 hatte GRÜNING Beobachtungen an den Lagern der Brooklyn-Bridge erwähnt, wonach “[...] die Bewegung der Lager infolge des Reibungswiderstandes ruckartig vor sich geht.” GRÜNING erklärte diese Beobachtung aber nicht mit konstruktiven Mängeln, sondern mit dem Wesen der Reibung. Danach setzt die Bewegung der Lagersättel immer ruckartig ein, sobald der Reibungswiderstand überwunden wird²¹¹ – ein normaler Ablauf, der bei Hängebriücken wegen seiner Belastungen für Gurtungen und Pfeiler ein Grund für die Einführung von Pendelpfeilern als Ersatz für massive gemauerte Pylone war [159/S.334] (Abb. 93).



Abb. 93: Passerelle Saint-Georges in Lyon (1852); Links: Ansicht, Rechts: Pylondetail; [673]

Insgesamt bleibt zu vermuten, dass das Potenzial einzelner Rollen bzw. auch der technisch aufwändigeren Lagersättel lange überschätzt wurde – auch in zeitgenössischen Fachbüchern. So schrieb zum Beispiel WEISBACH²¹² 1850 in seinem Handbuch *Der Ingenieur*:

„Die wälzende Reibung zwischen glatten Körpern von Metall, Holz oder Steinen ist so klein, daß sie in Ansehung der Zapfen- und gleitenden Reibung unbeachtet gelassen werden kann“ [357/S.409].

²¹¹ These wird gestützt durch Beobachtungen 1913 an insgesamt 16 Lagern von Balkenbrücken. Alle 3 bis 5 K Temperaturerhöhung gab es bei diesen eine von einem lauten Geräusch begleitete ruckartige Bewegung [67].

²¹² JULIUS LUDWIG WEISBACH (1806-1871).

Die anfänglichen Schwierigkeiten bei der Erfassung der Reibungsvorgänge in Rollenlagern lassen sich aber nicht allein auf konstruktive Schwächen und eine Unterschätzung des Reibungswiderstands reduzieren. Darüber hinaus gab es verschiedentlich Verständnisprobleme bezüglich des Wesens der auftretenden Reibung in Rollenlagern. Zur Jahrhundertmitte gingen selbst Fachleute noch davon aus, dass bei Zwischenlagern von Rollen ein Übertrag von Horizontalkräften praktisch unmöglich sei. Diesbezüglich aufschlussreich ist eine Diskussion Mitte der 1840er in *The Civil Engineer and Architect's Journal* zur gerade fertig gestellten Hungerford-Brücke (1841-45) in London (Abb. 94).

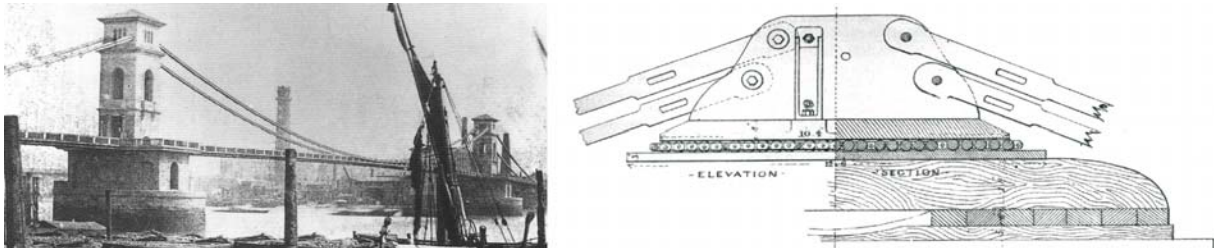


Abb. 94: Hungerford-Brücke; Links Ansicht [523], Rechts: Lagersattel [271]

Die Diskussion ergab sich als Folge einer im genannten Journal veröffentlichten Kritik eines Buches SIR HOWARD DOUGLAS', worin dieser die Stabilität der gemauerten Pylone auf Grund der eingetragenen Horizontalkräfte anzweifelte – trotz eingebauter Lagersättel. Der anonyme Rezensent, womöglich ein Herausgeber, schloss die Möglichkeit eines Eintrages von Horizontalkräften hingegen grundsätzlich aus²¹³. In der sich anschließenden Diskussion im Journal versuchte DOUGLAS, unter anderem durch Rückgriffe auf Erkenntnisse von COULOMB und BABBAGE (vgl. Tab. 26 auf S.148), den Eintrag beträchtlicher Horizontalkräfte in die Pylonspitze zu begründen [140/S.73] und schließlich die Notwendigkeit eines in-situ-Experiments über die Wirksamkeit der eingebauten Lagersättel zu bekräftigen²¹⁴. Ob es zu dieser Untersuchung jedoch kam, ist dem Verfasser nicht bekannt. DOUGLAS bedauerte bei seiner Argumentation den Mangel aufschlussreicher Versuche zur Reibung zylindrischer Körper mit konkreten Angaben von Reibungswerten [140/S.73].

²¹³ Er nahm bei DOUGLAS an, "what seems an error of principle" [272/S.286], namentlich die Konstruktion der Hungerford-Bridge anzuzweifeln und argumentierte, „[...] that the pressure of the rollers upon the top of the pier is normal to the surface in contact, and is therefore wholly vertical [...] concluding that the danger of the piers of Hungerford Bridge being overthrown [...] is purely imaginary" [272/S.287].

²¹⁴ „[...] whether the „shifting saddles“ be really efficient for their proposed object“ [140/S.74].

Auch bei den frühen eisernen Balkenbrücken hing die Dimensionierung der beweglichen Lager vorerst noch von den Erfahrungen der Brückenbauer ab. Entsprechend unterschiedlich werden die Ergebnisse gewesen sein, über welche jedoch nur gelegentlich berichtet wurde. Die Lager der Conway- und Britannia-Brücke zum Beispiel funktionierten zumindest anfangs ganz gut²¹⁵, so auch die Lager einer von MESSRS. FOX, HENDERSON & CO. im Zuge der Blackwall-Extension-Railway errichteten und aufwendig getesteten Bogen-Zugband-Brücke mit 120 Fuß (ca. 36 m) Spannweite²¹⁶. Es ist sehr wahrscheinlich, dass hierfür die 1848 gebaute Brücke über die Commercial-Road geprüft wurde. Deren Rückbau bot 1875 Gelegenheit zur Begutachtung des Zustandes dieser eventuell ersten in England errichteten Gelenkbolzenbrücke (Abb. 95). So wurden auch die beweglichen Lager untersucht, die mit Sicherheit zu den frühesten gebauten Brücken-Rollenlagern gehörten. Die Beschreibung des Zustands der Lager machte klar, dass die beweglichen Lager als solche seit vielen Jahren nicht mehr funktioniert hatten und deren Material der Belastung aus den sich ständig erhöhenden Verkehrslasten nicht gewachsen war. Die mit ca. 2 ½" wahrscheinlich zu klein gewählten Walzen waren oval verformt und hatten sich in die Lagerplatten eingedrückt. Der schlechte Zustand der Lager nährte die offenbar noch Mitte der 1870er-Jahre in Großbritannien geführte Debatte über Sinn oder Unsinn beweglicher Lager²¹⁷.

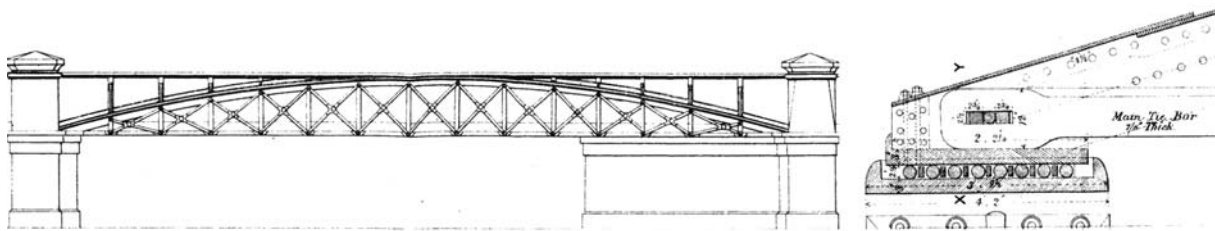


Abb. 95: Commercial-Road-Brücke, 1848; Links: Ansicht, Rechts: Detail des Rollenlagers; [281]

²¹⁵ Kurz nach der Eröffnung schrieb der an der Ausführung beteiligte CLARK: „[...] the rollers and balls are found to move freely during changes of temperature“ [133/S.602].

²¹⁶ “The action of these parts under proof has been found to be perfect“ [276/S.301].

²¹⁷ „The state of the moving ends of the girders throws some light on the controversy as to the usefulness of expansion rollers. In this bridge they had certainly been inoperative for many years; the roller carriages were quite fast to the bed-plates, and the rollers were worn oval, the vertical diameter being 2 5/16 in., whilst the horizontal diameter was 2 9/16 in. [Hinweis: Die bei den Durchmessern angegebenen Brüche zur Verdeutlichung der Deformation waren in der Quelle nicht eindeutig lesbar; A.d.Verf.]. There were grooves worn in the upper and lower cast iron plates opposite each of the rollers 1 ½ in. to 1 ¾ in. wide and ¼ in. deep along the centre line. These grooves and also the upper and lower surfaces of the rollers were curiously uneven, being nearly covered with broken ridges and furrows lying transversely to the axis of the rollers. The cross bars of the roller carriage touched both the upper and lower cast iron plates, and had made in them depressions of corresponding outline varying in depth from nearly 1/8 in. to a scarcely perceptible indentation; their surfaces were not ribbed in the peculiar way the others were, but were tolerable smooth. At the fixed end of the girder each plate had made a slight depression in the cast iron bed-plate, from which it may be inferred that there was a certain amount of motion at this end also“ [281/S.390].

Wegen der Unzulänglichkeiten der frühen Rollenlager gaben die Brückenbauer Gleitlagern oft noch den Vorzug, wie beim Bau der neuen Kinzig-Brücke bei Offenburg (1852-53),

„[...] weil die Rollen sich nach und nach in die oberen und unteren Lagerplatten eindrücken, und mithin die Verschiebung eher erschweren als leichter machen, und weil man die Überzeugung hatte, dass die Kraft der Ausdehnung des Gitters bei erheblichen Temperaturunterschieden auch vollkommen genügen werde, um die Reibung auf den Lagerplatten zu überwinden“ [119/S.183].

Es bleibt offen, inwieweit die Entscheidung zugunsten von Gleitlagern bei 63 Metern Spannweite zu Folgeschäden am Tragwerk der Kinzig-Brücke führte. Schon für kürzere Überbauten sind Schadensbilder am gemauerten Unterbau durch Eintrag großer Horizontalkräfte in der Literatur belegt²¹⁸. Sie gaben schließlich auch im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts Anlass zu expliziten Untersuchungen des Rollreibungswiderstands von Brückenlagern, um die Auswirkungen der Reibung auf den Über- und Unterbau zahlenmäßig erfassen zu können.

6.2.3 Praktische Versuche

Tab. 27 stellt die Versuche chronologisch zusammen und benennt dabei die wichtigsten Fragestellungen²¹⁹, nachfolgende Tab. 28 resümiert die wesentlichen Ergebnisse:

Tab. 27: Versuche zum Reibungsproblem

Jahr*	Name	Ort**	Fragestellung	Bereich	Verweis
1882	Périssé	Frankreich	Verhältnis von Gleit- und Rollreibung	Brückenbau	K3- 1
1907	VDI	Deutschland	Rollreibungsverhalten	Brückenbau	K3- 3
1910	Gehler	Deutschland	Rollwiderstand bei hohen Auflagerdrücken	Hochbau	K3- 4
1950	Föppl	Deutschland	Rollwiderstand	Allgemein	K3- 5
1962	Uetz/Hakenjos	Deutschland	Elastisch-plastisches Rollreibungsverhalten	Brückenbau	K3- 6
1967	Hakenjos	Deutschland	Elastisch-plastisches Rollreibungsverhalten	Brückenbau	K3- 7
1978	Maissen	Schweiz	Elastisch-plastisches Rollreibungsverhalten	Brückenbau	K3- 8

* Das angegebene Jahr entspricht in der Regel dem Jahr der Veröffentlichung. Teilweise ist jedoch das Jahr der Versuchsdurchführung angegeben, da es aus den Quellen genau ermittelt werden konnte. Die Versuche des VDI (1907) liefen über mehrere Jahre, hier ist das Jahr der Beendigung der Versuche genannt.

** Der Ort der Versuche ist nicht in jedem Fall explizit angegeben, sondern aus dem Wirkungskreis des Verfassers bzw. aus dem Veröffentlichungsland der Hauptquelle abgeleitet worden.

²¹⁸ Zum Beispiel in [75/S.358f], [151/S.256]. Anfang der 1970er-Jahre wurden Schäden an Auflagerbänken infolge hoher Auflagerreibung auch in Großbritannien diskutiert – siehe [11/S.2].

²¹⁹ Tab. 27 berücksichtigt nicht die Vielzahl von Versuchen zur Reibungsproblematik im Bereich des Maschinenbaus zur Wende zum 20. Jh. und später, die im Wesentlichen jedoch Einflüsse von Schmiermitteln und Geschwindigkeit untersuchten; siehe [23],[63],[246],[93].

Tab. 28: Ergebnisse der Versuche zu Rollenlagern

Jahr	Name	Erkenntnisse bezüglich der Beweglichkeit der Wälzkörper
1882	Périssé	Rollwiderstand unter normalen Bedingungen 7/1000, steigt bei besandeter Oberfläche um das Fünffache auf 35/1000 (entspricht 3,5%) [75/S.363] Rollreibung ca. 25x geringer als Gleitreibung [75/S.363]
1907	VDI	bereits bei kleinen Belastungen Wulstbildung, Reibungskräfte steigen dadurch stark an [90/S.10], „Anfahrts“-Reibung am größten [90/S.10] Beweglichkeit auch bei hohen Belastungen vorhanden [90/S.58]
1910	Gehler	Verformungen der Lauffläche mit Einfluss auf die Reibung; bei Verschmutzungen deutlich erhöhte Reibung [152/S.78]
1950	Föppl	Rollwiderstand lässt sich in guter Näherung durch eine allgemeingültige Formel abbilden [308/S.399]
1962	Uetz/ Hakenjos	übliche Wallbildung mit Erhöhung der Wälzreibung, aber unter Praxisbedingungen sei Wallbildung ähnlich der unter definierten Versuchsbedingungen nicht zu erwarten [98/S.543] Zunahme der Vickershärte im überrollten Bereich [98/S.541]
1967	Hakenjos	übliche Wallbildung mit Erhöhung der Wälzreibung, max. Reibungszahl nimmt bei definiertem Rollweg mit Anzahl der Doppelhübe zu [47/S.47] mit zunehmender Härte Rollreibungslinien mit flacherem Anstieg, d.h. Vorteil bei hoher Belastung [47/S.50] Paarung „weiche Walze/harte Platte“ mit günstigerer Wälzreibung als umgekehrt [47/S.51] Verfestigungen der Laufflächen durch Kaltverformung bis zu 35% [47/S.53]

Die Versuche konzentrierten sich fast ausschließlich auf Untersuchungen an Rollenlagern; einzig PÉRISSE berücksichtigte noch Gleitlager und konnte durch den direkten Vergleich die Vorteile von Rollenlagern gegenüber Gleitlagern bzgl. des Reibungswiderstands experimentell belegen. Er sah sich zu seinen Versuchen durch verschiedene Schadensfälle an den gemauerten Auflagerbänken unter Gleitlagern veranlasst [75/S.358]. Diese waren 1857 in Frankreich durch MOLINOS und PRONNIER für die Anwendung im Brückenbau empfohlen worden – vgl. Tab. 30 auf S.164 und führten dort frühzeitig zu einer verbreiteten Anwendung. Die Träger sollten sich auf einer gut gehobelten, mit Fett bestrichenen Platte bewegen können [150/S.27]. PÉRISSE wollte mit seinen Versuchen in erster Linie die Überlegenheit von Rollenlagern gegenüber Gleitlagern in Bezug auf die übertragende Reibung beweisen.

Der Erkenntniswert der VDI-Versuche blieb wegen der bereits im Punkt 6.1.3 genannten Einschränkungen vergleichsweise gering. Eine der dem Antrag zugrunde liegenden Hauptfragen – bis zu welcher Belastung die Lager noch hinreichend beweglich bleiben – konnte nur teilweise beantwortet werden [90/S.58]. Als wesentliche Erkenntnis war festzustellen, dass die Rollreibungszahl proportional mit der Belastung zunimmt (Abb. 96) und dass die Beweglichkeit bis zu den höchsten im Versuch aufgebrauchten Lasten erhalten blieb [90/S.58].

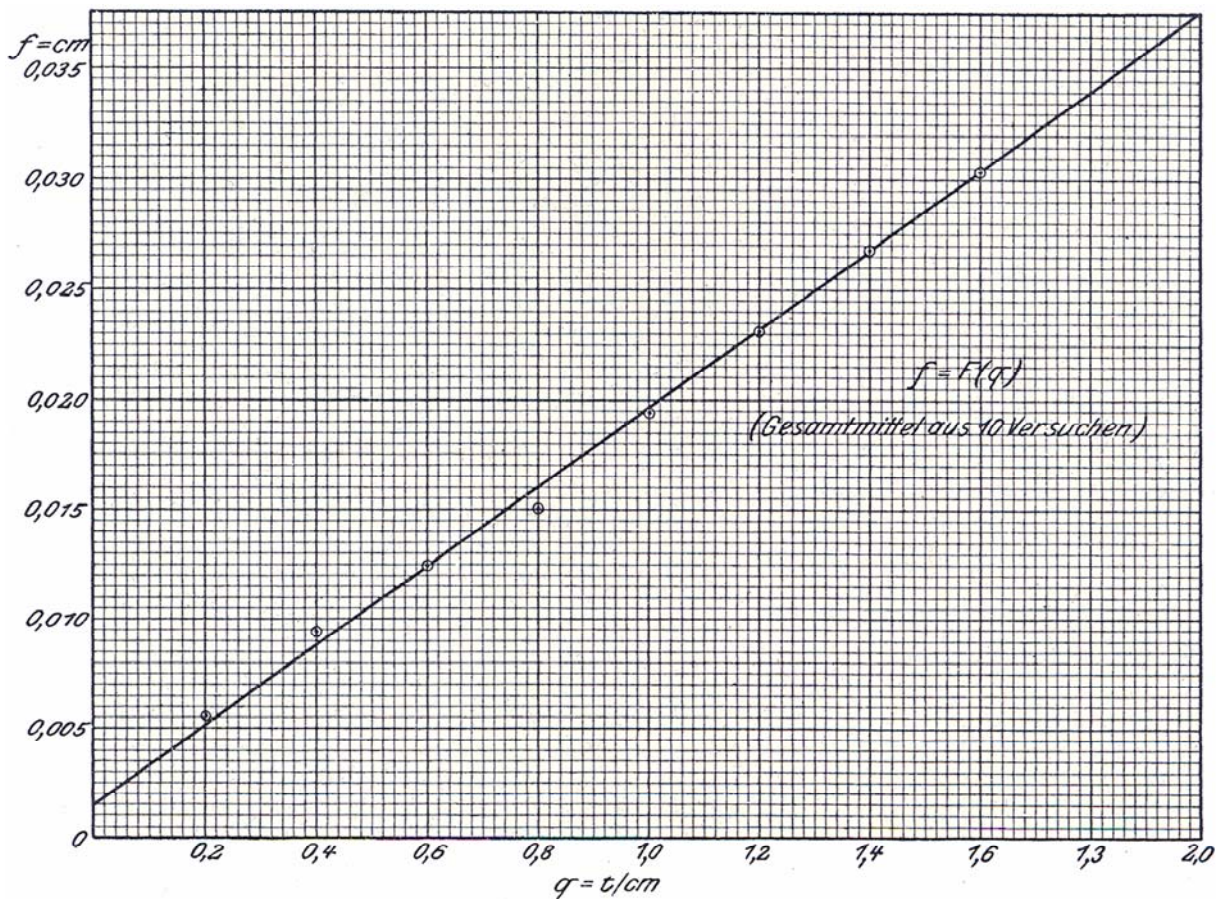


Abb. 96: Mittlere Reibungszahlen aus den VDI-Versuchen [90]

Auf Grund dieser insgesamt jedoch begrenzten Aussagekraft sah sich GEHLER kurze Zeit später zu eigenen Versuchen veranlasst, um präzise Aussagen für hoch belastete Lager zu ermitteln. Der Versuch FÖPPLS, aus den Ergebnissen im Labor eine allgemeingültige Formel zur Berechnung des Reibungswiderstands nur in Abhängigkeit der interagierenden Radien und Werkstoff-E-Moduli zu ermitteln, bildete prinzipiell den Abschluss einer vornehmlich erkenntnisorientierten Phase²²⁰.

Die Versuche nach dem Zweiten Weltkrieg sind einer anwendungsorientierten Phase zuzuschreiben. Sie erfolgten im Zusammenhang mit der Erteilung amtlicher Zulassungen für neue, hochfeste Brückenlager. HAKENJOS erweiterte dabei im Rahmen seiner Dissertation [47] die Untersuchungen auf die für gusseiserne und stählerne Brückenlager üblichen Werkstoffe, in erster Linie jedoch, um die Vorteile des neuen hochfesten Lagermaterials zu bele-

²²⁰ Der Ansatz FÖPPLS blieb offenbar erfolglos, denn außer dem im Katalog erwähnten Verweis wurde weder eine Veröffentlichung zu diesen Versuchen noch eine Bezugnahme auf diese durch Dritte bekannt.

gen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit interessieren einige exakt aufgenommene Oberflächenprofilaufnahmen, welche die Wulstbildung am Anfang und am Ende des Verschiebungsweges der Walzen abbilden (Abb. 97).

Diese Wulste führten zu erhöhten Reibungszahlen in diesen Bereichen. Bei den oben genannten Untersuchungen des VDI bildeten sich wegen des vergleichsweise weichen Probenmaterials sehr ausgeprägte Wulste aus, die zu Beeinträchtigungen während des Versuchsablaufs führten.

MAISSENS Versuche bestätigten im Wesentlichen nur die Erkenntnisse HAKENJOS'. Die Veröffentlichung erfolgte primär mit dem werbenden Ziel, über die Möglichkeiten für die Prüfung von Lagern an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) zu informieren [69/S.3].

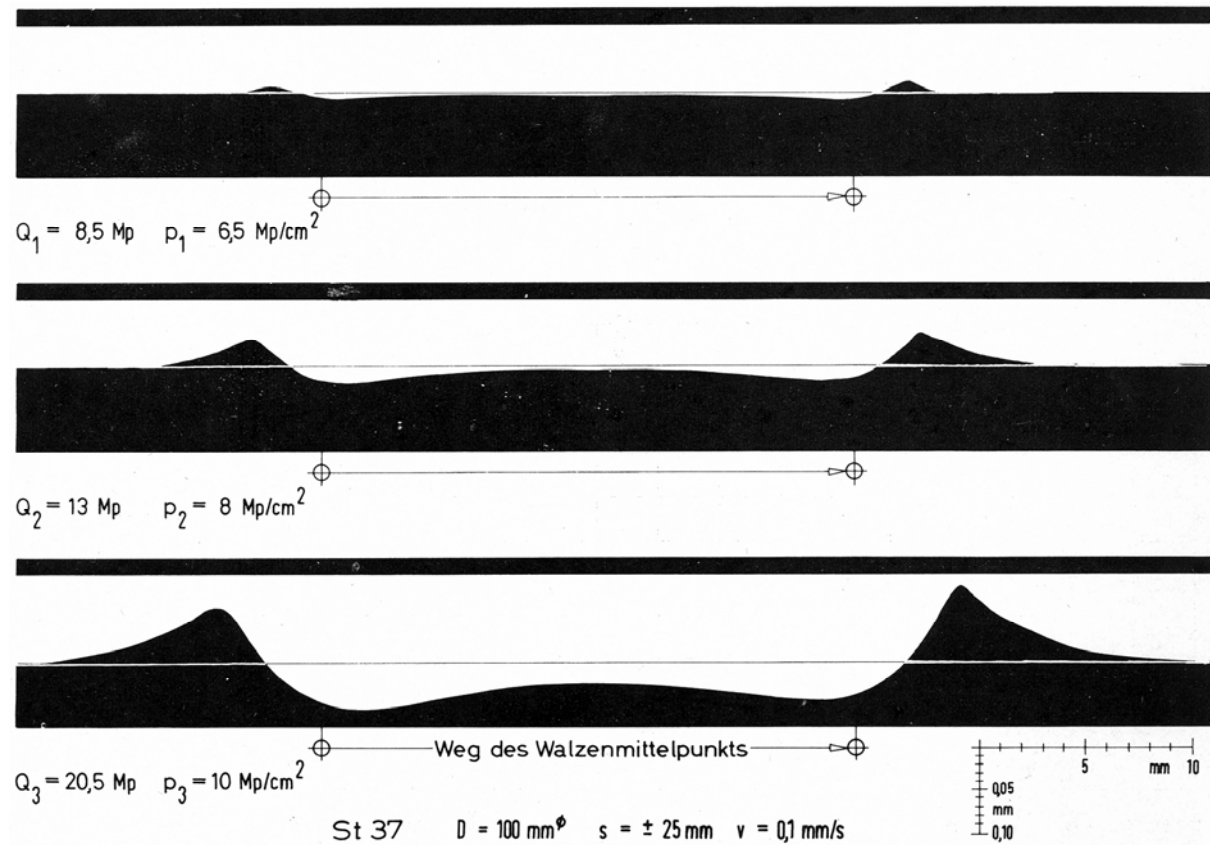


Abb. 97: Oberflächenprofilaufnahmen von der Wälzbahn einer Platte aus St 37 (3 Versuche mit unterschiedlicher Auflast und unterschiedlichen Prüfstellungen) [47]

6.2.4 Erkenntnisse der Versuche im Spiegel der Fachliteratur

Auf Grund der Vielzahl der insgesamt zum Thema „Reibung“ durchgeführten Versuche soll nachfolgende Tab. 29 aufzeigen, ob und wie sich die Erkenntnisse in den Angaben ausgewählter Fachliteratur und im Normen- und Regelwerk widerspiegeln. Bei der Auswertung wurden berücksichtigt:

- wichtige Vertreter der deutschen Handbuchliteratur zur Technischen Mechanik des frühen 19. Jahrhunderts, beginnend mit GERSTNERS *Handbuch der Mechanik*, denn es galt als „[...] das herausragende deutschsprachige Kompendium der wissenschaftlichen Technik in der ersten Jahrhunderthälfte“ [535/S.28],
- verschiedene Ingenieurhandbücher, die ab der Mitte des 19. Jahrhunderts als neue Gattung von Fachbuch auf dem Markt erschienen [536/S.870f]. Berücksichtigt werden u.a. ausgewählte Auflagen des *Hütte - Des Ingenieurs Taschenbuch*²²¹,
- diverse Enzyklopädien über Baukonstruktionen und - im Zuge weiterer Spezialisierung – über den Brückenbau²²²,
- ausgewählte Fach- und Lehrbücher, die sich ab der Wende zum 20. Jahrhundert explizit den e i s e r n e n Brücken widmeten,
- unterschiedliche Normen- und Regelwerke.

²²¹ Ingenieurhandbücher sollten das sich dynamisch entwickelnde Wissen der Technik als Arbeitsmittel für die Ingenieurpraxis handlich verfügbar machen. „Hütte – Des Ingenieurs Taschenbuch“ gilt als das erfolgreichste deutschsprachige Exemplar seiner Art [536/S.871].

²²² Ausgewertet wurden z.B. RÖDER: *Praktische Darstellung der Brückenbaukunde nach ihrem ganzen Umfange*. Darmstadt: Heyer's Verlagsbuchhandlung (1.Aufl. 1821); BREYMANN: *Allgemeine Baukonstruktionslehre*. Stuttgart: Hoffmann'sche Verlags-Buchhandlung (1.Aufl. 1849); BECKER: *Der Brückenbau in seinem ganzen Umfange*. Stuttgart: Macken Verlagsbuchhandlung (1.Aufl. 1853); WINKLER: Vorträge über Brückenbau. Eiserne Brücken. 2.Heft: *Gitterträger und Lager gerader Träger*. Wien: Carl Gerold's Sohn (2.Auflage 1875). Die zur Publikation gelangten Teile von WINKLERS Enzyklopädie gaben „[...] den damals umfassendsten Einblick in den Brückenbau“ [533/S.17] und können als Beginn einer streng wissenschaftlichen Behandlung des Brückenbaus bezeichnet werden [490/S.435].

Tab. 29: Entwicklung der Angaben zu Reibungskoeffizienten zu Rollenlagern in Deutschland bzw. BRD/DDR

Jahr	Name	Gleitreibung			Wälzreibung		Verweis
		Gusseisen/ Gusseisen $\mu =$	Schmiedeeisen/ Gusseisen $\mu =$	Schmiedeeisen/ Schmiedeeisen $\mu =$	vom Walzendurchmesser abhängig $\mu =$	unabhängig $\mu =$	
Fachliteratur							
1831	Gerstner	0,29 ¹⁾	-	-	-	-	K4- 1
1832	Eytelwein	0,29 ¹⁾	-	-	-	-	K4- 2
1845	Weisbach	0,24 ¹⁾	-	-	-	-	K4- 3
1850	Weisbach	-	0,19	0,13	0,25 ^{A)}	-	K4- 4
1857	Hütte, 1.Aufl.	0,16 ⁴⁾	0,19	0,13	-	-	K4- 5
1867	Heinzerling	0,23	0,19	0,13	-	-	K4- 7
1875	Winkler	0,20 ¹⁾	-	-	0,15	-	K4- 8
1902	Hütte, 18.Aufl.	-	0,17...0,37 ⁴⁾	0,14...0,40 ⁴⁾	-	-	K4- 10
1905	Vianello	0,30 ³⁾	-	-	0,15 ^{B)}	-	K4- 12
1908	Häseler	0,20 ³⁾	-	-	0,25 ^{C)}	-	K4- 14
1916	Rasch	-	-	-	variabel ^{D)}	-	K4- 16
1922	Schaper, 5.Aufl.	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 17
1924	Bleich	0,20	-	-	variabel ^{D)}	-	K4- 19
1931	Gehler	0,20 ¹⁾	-	-	-	0,03	K4- 21
1934	Schaper, 6.Aufl.	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 22
1950	Hütte, 27.Aufl.	0,15 ⁴⁾	-	0,22...0,25 ²⁾	-	-	K4- 24
Normen- und Regelwerk							
1895	Bayer. Bahn	-	-	-	-	0,25	K4- 9
1900	Württem. Bahn	0,25 ³⁾	-	-	-	-	[126/77]
1908	Bayer. Bahn	0,25 ³⁾	-	-	-	0,25	K4- 13
1923	DIN E 1072	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 18
1925	B.E.	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 20
1934	B.E. 4.Aufl.	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 23
1963	Dv 804	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 25
1980	DV 804	0,20 ³⁾	-	-	-	0,03	K4- 26
Wegfall der historischen Lagerkonstruktionen aus dem Normenwerk							
1984	DIN 4141	-	-	-	-	-	K4- 27
1985	DIN 1072	- ⁵⁾	-	-	-	0,05	K4- 28
¹⁾ pauschal für Gleitpaarung Eisen/Eisen ²⁾ pauschal für Gleitpaarung Stahl/Stahl ³⁾ pauschal für Gleitlager ⁴⁾ Angabe für ungünstige Schmierung ⁵⁾ weil konventionelle Gleitlager nicht mehr gebräuchlich, Verweis auf DIN 4141 bzw. Zulassungsbescheide der neuen Gleitlagertechnologie (PTFE-Lager)				^{A)} variiert zwischen 0,2...0,3 ^{B)} nach Winkler ^{C)} bei mittlerer Schmierung ^{D)} ergibt sich aus einer Funktion abhängig von der Auflast und der Walzengeometrie			

Bei der Aufarbeitung der Erkenntnisse zur Reibung zitierten die frühen Handbücher der Mechanik – sowohl EYTELWEIN²²³ [299/S.247] als auch GERSTNER [313/S.490] – die Versuche und Erkenntnisse von COULOMB. Diese zählten bis dato zu den aufwändigsten und umfangreichsten Versuchen zur Reibung und waren durch die Publikation der Erkenntnisse in [292] bzw. in [293] auch einer breiten Leserschaft zugänglich geworden. WEISBACH bezog sich in seinem Lehrbuch darüber hinaus auf die seinerzeit aktuellen Ergebnisse von MORIN, RENNIE und DUPUIT.

In den Ingenieurhandbüchern bleiben die Quellen der Angaben oft ungenannt. Ihrem Anspruch folgend, stellen diese Handbücher im Sinne eines kommentierten Tafelwerks zwar die Reibungsbeiwerte sehr differenziert für alle möglichen Materialpaarungen zusammen, zu den verwendeten Quellen finden sich aber oft nur pauschale Anmerkungen im Vorwort²²⁴. So bleibt oft unklar, inwieweit neueste Versuche zur Reibung und deren Ergebnisse berücksichtigt wurden²²⁵.

Letzteres gilt sinngemäß für die bei der Auswertung berücksichtigten Enzyklopädien sowie für die Fach- und Lehrbücher²²⁶. Auch WINKLER blieb die Quelle für die angegebenen Reibungsbeiwerte schuldig. Der von ihm eingeführte pauschale Reibungskoeffizient der Gleitreibung sollte sich in der Fachliteratur langfristig etablieren – befördert sicherlich durch SCHAPERS²²⁷ *Eiserne Brücken – Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Studierende und Konstrukteure* [237], das zwischen 1908 und 1949 in insgesamt sieben Auflagen²²⁸ erschien. Auch SCHAPER verzichtete auf die Angabe der Quelle, bezog sich aber konsequent auf den schon von WINKLER vorgeschlagenen Wert. SCHAPER empfahl zudem für den Reibungskoeffizienten der Wälzreibung trotz dessen Abhängigkeit vom Rollendurchmesser vereinfachend einen mittleren, wohl in der Praxis üblichen Koeffizienten für alle Durchmesser von $\mu=0,03$.

²²³ JOHANN ALBERT EYTELWEIN (1764-1849).

²²⁴ Z.B. bei HEINZERLING; WEISBACH verwies auf eine vollständige Literaturliste in seinem *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik* [356], das praktisch gleichzeitig erschien.

²²⁵ Bei der *Hütte* sind die Vielzahl und teilweise sehr differenzierten Angaben von Reibungskoeffizienten auffallend. Im Vorwort zum ersten Band findet der Leser nur den pauschalen Verweis auf ausgewählte Literatur als Quelle. Während sich Band 1 der *Hütte* offenbar an WEISBACHS Handbuch orientierte, zitierte die Ausgabe von 1902 unter Angabe der Quellen umfangreich die Ergebnisse der Versuche von RENNIE, MORIN, POIRÉE, GALTON (vgl. Tab. 26) sowie Veröffentlichungen in Bauzeitungen.

²²⁶ Weder VIANELLO noch SCHAPER gaben konsequent die Quellen zu den gewählten Reibungsbeiwerten an. Verwies VIANELLO bei seinem Wert für die Wälzreibung noch auf WINKLER, empfahl er ohne Angabe von Quelle oder Grund mit $\mu=0,3$ für die Gleitreibung einen vergleichsweise hohen Wert – veranlasst vielleicht durch seine praktische Erfahrung in italienischen Maschinenfabriken und Brückenbauanstalten.

²²⁷ GOTTFRIED SCHAPER (1873-1942).

²²⁸ In der 6.Auflage als *Feste stählerne Brücken* (1934), in der 7.Auflage als *Stählerne Brücken* (1949), letztere nach dem Tod SCHAPERS 1942.

In die Wahl dieses Wertes dürften die inzwischen aus Versuchen gewonnenen Erkenntnisse eingeflossen sein. Bei den Versuchen des VDI wurde dieser Wert unter praxisüblichen Belastungen nicht überschritten [128/S.570], und die Versuche GEHLERS für hoch belastete Brückenlager ergaben für verschmutzte Laufflächen einen Reibungsbeiwert von nur 1,5% – also 0,015 [152/S.78].

Die von SCHAPER eingeführten bzw. verwendeten Werte blieben im 20. Jahrhundert in der Fachliteratur nahezu unverändert²²⁹. Die inzwischen veröffentlichten Ergebnisse der VDI-Versuche spielten kaum noch eine nennenswerte Rolle. In mit den von VIANELLO und SCHAPER vergleichbaren Fachbüchern gab es nur in BLEICHS *Theorie und Berechnung der eisernen Brücken* von 1924 einen Ansatz, die Ergebnisse der VDI-Versuche bei der Berechnung des Koeffizienten der Wälzreibung zu berücksichtigen, allerdings aufwändiger als bis dahin üblich als Funktion in Abhängigkeit von der Auflast und der Walzenlänge [128/S.570].

Mit Verweis auf die in der Regel aufwändigen Versuche zur Ermittlung von Reibungsbeiwerten hatte RASCH schon 1916 einen alternativen theoretischen Weg vorgeschlagen. Er zeigte, dass der Reibungskoeffizient prinzipiell eine geometrische Größe mit einer Längeneinheit sei²³⁰ und dass bei Kenntnis der längen- und flächenbezogenen Kontaktspannungen der Reibungskoeffizient direkt berechenbar sei.

Die Vorschläge BLEICHS und RASCHS, den Reibungskoeffizienten variabel in Abhängigkeit von der Belastung und Walzengeometrie jeweils erst zu bestimmen, war zu aufwändig, um in das sich etablierende Vorschriften- und Regelwerk integriert zu werden und zu akademisch, um in der Brückenbaupraxis Beachtung zu finden. Schließlich war – laut SCHAPER – die Berücksichtigung der Lagerreibung für den Überbau in der Regel nicht erforderlich²³¹ [240/S.117]. Auch bei der Bemessung der Auflagerbänke genügte normalerweise ein pauschaler Ansatz.

BLEICH [128/S.563] und RASCH [80/S.16] verwiesen bereits auf den Zusammenhang zwischen der Härte des Lagermaterials und der Lagerbemessung, was zunächst zwar ohne praktischen Nutzen blieb, aus heutiger Sicht jedoch einen interessanten Ansatz für die in-situ-Beurteilung des historischen Lagermaterials darstellt.

²²⁹ Erst im Ergebnis der Untersuchungen von HAKENJOS wurde der Rollreibungsbeiwert im späten 20. Jahrhundert erhöht.

²³⁰ Ein derartiger Ansatz findet sich bereits in [635/S.207].

²³¹ Erst in der 5.Auflage SCHAPERS *Eiserne Brücken* von 1922 in dieser Form verankert; auch in den von SCHAPER verantworteten Regelwerken (vgl. Punkt 5.3.5) der Deutschen Reichsbahn – siehe [413/S.35].

6.2.5 Bewegliche Brückenlager – die Praxis

Insbesondere auf Grund der bereits im 18. und frühen 19. Jahrhundert gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Vorteile der Wälz- gegenüber der Gleitreibung sollte man vermuten, dass Gleitlager innerhalb des Untersuchungszeitraumes im Brückenbau nur eine untergeordnete Rolle spielen würden, z.B. für leichte Bauwerke mit geringer Spannweite. Vergleicht man jedoch den theoretischen Erkenntnisstand mit der in Tab. 30 reflektierten Brückenbaupraxis, ergibt sich ein ambivalenteres Bild. Zum einen wurden – dem erwähnten Erkenntnisstand entsprechend – bereits in den 1850er-Jahren Gleitlager nur für Spannweiten bis ca. 10 Metern empfohlen. Andererseits kamen noch in den 1860er-Jahren solche für Spannweiten bis etwa 90 Metern zur Anwendung – die Gleitlager der Kinzigbrücke mit 63 Metern Spannweite wurden bereits erwähnt. Der von FRÄNKEL und WINKLER um 1870 eingeführte Grenzwert von 30 Metern hielt sich ungeachtet der Erkenntnisse PÉRISSÉS zu den Vorteilen der Wälzreibung bis ins frühe 20. Jahrhundert. Noch 1905 wird er von VIANELLO als Grenzwert empfohlen; die von ihm zur Jahrhundertwende angeregten Versuche des VDI – auch zur Beweglichkeit von Brückenlagern – waren noch nicht abgeschlossen.

In Bayern hatte sich alternativ bereits der Auflagerdruck als Entscheidungskriterium durchgesetzt. Galten in der Erstauflage der dortigen Vorschriften der Ländereisenbahn noch 6 Tonnen Auflagerdruck als oberer Grenzwert für Gleitlager, so waren es in der Ausgabe von 1908 schon 15 Tonnen. Dieser Ansatz wurde auch in das Regelwerk der Deutschen Reichsbahn übernommen, wo 12 Tonnen als Grenzwert festgelegt wurden. Parallel dazu wurde die maximale Spannweite für Gleitlager auf 12 Meter, später auf 10 Meter begrenzt. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde der Auflagerdruck als Abgrenzungskriterium zugunsten der „10 Meter Spannweite“ im Geltungsbereich der Deutschen Bundesbahn wieder aufgegeben, womit man in etwa wieder bei den dann rund hundert Jahre alten Empfehlungen BECKERS lag.

Tab. 30: Angaben zur Anwendung von Gleit- bzw. Rollenlagern im Untersuchungszeitraum

Jahr	Name	Ort		Quelle
1857	Molinos, Pronnier	Frankreich	geben prinzipiell Gleitlagern den Vorzug, weil diese billiger sind und weniger Erschütterungen übertragen, verweisen aber auf die erhöhte Reibung	[210/S.83]
1858	Stein	Deutschland	bei der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn ab 50 Fuß (ca. 15m) Rollenlager	[181/S.14] [253/S.471]
1858	Becker	Deutschland	bei Öffnungen größer 30 Fuß (ca. 9m) Rollenlager	[120/S.166]
1860	Treuding	Deutschland	bei Öffnungen größer 30 Fuß (ca. 9m) Rollenlager	[258/S.183]
1865	Schwedler	Deutschland	bei kleinen Brücken Gleitlager, bei größeren Rollenlager	[249/S.338]
1869	Fränkel	Deutschland	ab ca. 30m bewegliche Lager erforderlich	[149/S.194f]
um 1870	Mehrtens	allgemein	rückblickend Gleitlager in Einzelfällen bis zu Spannweiten von 90m angewandt	[204/S.87]

1875	Winkler	allgemein	rückblickend Gleitlager bis zu Spannweiten von etwa 80m angewendet, Spannweite von 30m als Grenze empfohlen	[108/S.498]
1882	Steiner	allgemein	Gleitlager bis 30m, weil kostengünstig, ab 30m Rollenlager (hier wahrscheinlich Bezug auf Winkler)	[236/S.498]
1882	Gamber	Österreich	allgemein bis 30m, oft auch darüber hinaus nur Gleitlager, empfiehlt ab 20m Walzenlager o.ä.	[151/S.254f]
um 1895	Bayerische Staatsbahn	Bayern	ab 6t Auflagerdruck Walzenlager vorgeschrieben, in der Ausgabe von 1900 erst ab 10t Auflagerdruck, 1908 erst ab 15t Auflagerdruck	[391/P.39] [397/S.27] [403/P.41]
1903	Badische Staatsbahn	Baden	ab 20m Stützweite Rollen- oder Pendellager	[398/S.1]
1905	Vianello	Deutschland	bis 30m Gleitlager zulässig	[259/S.476]
1908	Schaper	Deutschland	ab 15m Rollenlager empfohlen	[237/S.357]
1908	Häseler	Deutschland	Rollenlager empfohlen für schwere Brücken ab 10m, für leichte Brücken ab 20m Spannweite	[161/S.108]
1911	Schaper	Deutschland	bis 12t Auflagerdruck aus ständiger Last	[238/S.420]
1925	Reichsbahn	Deutschland	Gleitlager bis 12t Auflagerdruck oder bis 12m Spannweite	[414/S.17]
1931	Gehler	Deutschland	Rollenlager für Eisenbeton-Balkenbrücken ab ca. 10m	[507/S.171]
1938	Reichsbahn	Deutschland	Gleitlager bis 12t Auflagerdruck oder bis 10m Spannweite	[425/S.32]
1955	Bundesbahn	BRD	ab ca. 10m Stützweite Walzen-/Stelzenlager erforderlich	[438/S.19]
1973	DB	BRD	ab ca. 10m Stützweite Walzen-/Stelzenlager erforderlich	[443/S.19]

6.2.6 Dimensionierung der Wälzkörper

Nachfolgend soll stichprobenartig untersucht werden, ob und wie im Untersuchungszeitraum die angestrebte Beweglichkeit die Dimensionierung der Wälzkörper beeinflusste. Die Probleme der Reibung ließen sich dabei nicht mehr losgelöst von denjenigen der Berührung behandeln. Ausgewählte, frühe und bereits im Abschnitt 6.1.1 diskutierte Dimensionierungsansätze bilden den Einstieg in die Diskussion.

Als WERDER in den 1850ER-Jahren die vom Prinzip her völlig neuen Lager der Großhesseloher Isar-Brücke entwarf, waren ihm Idee und Konstruktion beweglicher Lager nicht neu, sondern zumindest vom Dachstuhl der Walhalla²³² sowie von der Günzbrücke²³³ her vertraut. Abweichend von diesen besaßen die von ihm verantworteten Lager der Großhesseloher Brücke jedoch hohe Stelzen, die fortan die WERDER'schen Brückenlager kennzeichnen sollten. Zum Hintergrund der hohen Stelzen berichtete GERBER in [155/S.15]:

²³² Entstand unter WERDERS Leitung in den 1830er Jahren [503/S.150].

²³³ WERDER hatte v.PAULI bei der technischen Ausgestaltung der Fischbauchträger beraten [503/S.154]. WERDER waren mit Sicherheit die Bolzen-Kipplager der Günzbrücke bekannt, sie waren evtl. von ihm selbst entworfen.

„Man wendete Stelzen [...] an, weil offenbar der Druck, dem man eine Walze aussetzen darf, mit dem Durchmesser derselben zunimmt, daher man durch größere Höhe an der Gesamtlänge der Stelzen und dadurch zugleich an der Größe der Auflagerplatten spart“

Dem Verfasser scheint die Annahme plausibel, dass dem Maschinenbauer WERDER die Zusammenhänge zwischen Walzenradius und Reibungswiderstand entweder bekannt waren²³⁴ oder WERDERS Instinkt als Konstrukteur ihm diesen Zusammenhang suggerierte. Wenngleich nicht explizit von GERBER benannt, so waren die Stelzen in ihrer Form sicherlich auch zur Gewährleistung guter Beweglichkeit so von WERDER gewählt worden.

Der Bezug SCHWEDLERS zum Reibungsproblem lässt sich am besten an seinem bereits beschriebenen Bemessungsansatz von 1861 diskutieren:

„Der Druck einer ebenen Gußeisenfläche auf eine Gußeisenrolle kann pro Zoll Durchmesser und pro Zoll Länge derselben 1 Zentner betragen, ohne daß die Elasticität des Materials alterirt wird“ [248/S.599].

Zwar ließ SCHWEDLER den abschließenden Halbsatz unkommentiert, aus Sicht des Verfassers sollte diese Einschränkung jedoch zweifellos Verformungen der Wälzkörper im Kontaktbereich verhindern und damit dauerhaft die Beweglichkeit der Lagerwalzen sicherstellen.

1876 gibt BAENTSCH nach einer knappen theoretischen Herleitung der Tragfähigkeit der Lagerwalzen einen Einblick, wie er das Wechselspiel von Walzen-Tragfähigkeit und Lagergebrauchstauglichkeit bei der Bemessung berücksichtigte:

„[...] Da nun aber von einem Rollenaufleger in erster Linie verlangt wird, dass dasselbe eine möglichst leichte Beweglichkeit gestattet, und da der Reibungswiderstand im umgekehrten Verhältnis zum Durchmesser der Rollen steht, so wird es sich empfehlen, statt der obigen Werthe [zur Tragfähigkeit der Walzen, A.d.Verf.] kleinere, und zwar solche die etwa nur die Hälfte obiger Werthe bilden, als zulässig anzunehmen“ [7/S.330].

Diese drei Beispiele aus den Entwicklungsjahren der gusseisernen und stählernen Brückenlagertechnik verdeutlichen einerseits den qualitativen Ansatz zur Verringerung der Reibung, sie zeigen andererseits aber auch das Spektrum, dessen sich die Brückenbauer bedienten – WERDER diskutierte das Problem als ein geometrisches, SCHWEDLER bezog sich auf Materialeigenschaften und BAENTSCH auf die Belastung.

²³⁴ Die Erkenntnisse COULOMBS waren zwischenzeitlich auch in deutscher Sprache publiziert worden [292/S.75].

Spätestens nachdem WINKLER das Buch *Die Gitterträger und Lager gerader Träger* 1872 in der ersten und 1875 in der zweiten verbesserten Auflage [108] veröffentlicht hatte, waren die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge für die Dimensionierung der Brückenlager verständlich aufgearbeitet den Brückenkonstrukteuren zugänglich. WINKLER verdeutlichte an Hand von Zahlenwerten die gegenüber der gleitenden Reibung deutlich geringere wälzende Reibung sowie die umgekehrt proportionale Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom Walzendurchmesser. In diesem Zusammenhang betonte er die Vorteile von hohen Stelzen gegenüber Walzen mit Bezug auf die Lagerreibung und empfahl einen pauschalen Zuschlag zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit:

„In Hinsicht auf die Festigkeit genügt für die Stelzen natürlich dieselbe Anzahl und derselbe Durchmesser, wie für die Walzen. Mit Rücksicht auf die möglichste Herabminderung der rollenden Reibung wird es aber rathsam sein, den Durchmesser grösser anzunehmen und zwar etwa 1,6 mal so gross als den der Walzen, [...]“ [108/S.277].

Zugleich konzentrierte sich in der zweiten Jahrhunderthälfte der Bau von Großbrücken in den Händen einiger weniger Brückenbauanstalten mit einem „[...] ausgezeichneten Stab von theoretisch und praktisch durchgebildeten Beamten“ [204/S.93]. Zumindest für den Großbrückenbau schien das Zusammenspiel von theoretischen Erkenntnissen einerseits und praktischen Erfahrungen andererseits bei Entwurf und Bau der Brückenlager garantiert²³⁵.

Sobald jedoch das Netz der Hauptlinien um 1880 in Deutschland weitgehend errichtet war, ging der Bau von größeren Eisenbahnbrücken deutlich zurück [204/S.63]. Bereits in der schwächeren Konjunktur ab Mitte der 1870er-Jahre hatten sich immer mehr Maschinenfabriken auch dem Brückenbau zugewandt, so dass sich beim noch anstehenden verstärkten Ausbau der Nebenbahnen²³⁶ ab ca. 1880 die erfahrenen Brückenbauanstalten den Markt mit weniger erfahrenen Unternehmen teilen mussten. Naturgemäß war damit die Qualität nicht in jedem Fall sichergestellt, was sich nicht nur auf die Überbauten, sondern auch auf Entwurf und Bau der gusseisernen und stählernen Brückenlager auswirken musste. Die ab Mitte der 1890er-Jahre sukzessive von den einzelnen Staatseisenbahnen herausgegebenen Vorschriften für den Bau eiserner Brücken sollten unter anderem wegen dieser Entwicklung verbindliche technische Standards definieren²³⁷.

²³⁵ Interessant hierzu die Ausführungen zur Situation bei der Gesellschaft Harkort in [509/S.18f].

²³⁶ Allein im Bereich der Preußisch-Hessischen Staatsbahnen wurden zwischen 1880 und 1910 an Hauptbahnen nur 1118 km, an Nebenbahnen dafür 14325 km neu gebaut; [524/S.185].

²³⁷ Vgl. dazu auch Abschnitt 5.3.3.

Bereits im Kapitel zum Berührungsproblem wurde festgestellt, dass noch zur Jahrhundertwende die Dimensionierung von Lagern einer wissenschaftlichen Grundlage entbehrte.

„Die Auflager haben gehalten – das ist das einzige, was für sie spricht. Ob und in wie weit mitunter bleibende Formänderungen und damit eine Beschränkung der Beweglichkeit eingetreten ist, müsste erst noch festgestellt werden“ [105/S.135],

kritisierte WEYRAUCH 1894 und unterstrich damit den nach wie vor empirischen, gleichwohl erfolgreichen Zugang zur Lagerbemessung.

Mit den maßgeblich von ihm in den Brückenbau eingeführten HERTZ'schen Formeln existierte um 1900 erstmals die Möglichkeit, die Vorgänge in den Berührungspunkten zwischen Lagerplatten und Wälzkörper zahlenmäßig zu erfassen. Damit stand ein neues Werkzeug zur Verfügung, die zu erwartenden Formveränderungen und somit Beeinträchtigungen der Beweglichkeit zu steuern. Gleichwohl fehlte Gewissheit, wann das Material unter den besonderen Bedingungen im Kontaktbereich zu fließen beginnt. Die resultierende Unsicherheit fand sich auch in WEYRAUCHS äußerst vorsichtigem und vom Konjunktiv durchsetzten „Herantasten“ an Empfehlungen für erste zulässige Kontaktspannungen nach HERTZ: „Nach den [...] bisherigen Annahmen würde man sehr mäßig rechnen, wenn man vorläufig etwa setzen wollte [...]“²³⁸ [105/S.142]“. Trotz eines verbesserten theoretischen Modells musste man also weiterhin abwarten, wie sich der Ansatz in der Praxis bewährte. Die dort gemachten Erfahrungen erlaubten dann schnell sehr viel höhere zulässige Spannungen, vgl. dazu Tab. 22 auf S.134.

Im frühen 20. Jahrhundert wurde die Leichtgängigkeit der Wälzkörper durch die Entwicklung hin zu Ein- bzw. Zweirollenlagern indirekt befördert. Bei der Ausarbeitung erster Normenentwürfe für Brückenlager zu Beginn der 1920er-Jahre ließ man Lager mit drei und mehr Rollen schon gänzlich außer Acht [457/S.357]. Hintergrund dafür waren jedoch mehr die klaren statischen Verhältnisse beim Ein- und Zweirollenlager als eine Verringerung der Wälzreibung. Die Berechnungshinweise zu Brückenlagern sahen fortan vor, bei Anwendung von mehr als zwei Walzen die zulässigen HERTZ'schen Spannungen deutlich zu verringern. Allein aus wirtschaftlichen Gründen sollten nunmehr selbst bei großen Brückenbauwerken immer öfter Zweirollenlager mit dann auch großen Durchmessern der Wälzkörper eingebaut werden. Der damit einhergehende verminderte Reibungswiderstand war eine positive Begleiterscheinung, nicht jedoch ausschlaggebend für diese Entwicklung.

²³⁸ Es folgen die im Kapitel zum Berührungsproblem zitierten Spannungsangaben.

6.2.7 Wertung

Der mit dem Einbau von Lagern in Brückenbauwerken verbundene technische Aufwand war im Prinzip allein dem Ziel geschuldet, Relativbewegungen zwischen Überbau und Unterbau einer Brücke zu gestatten. Somit stand die Dimensionierung aller Bauteile – insbesondere aber die der Wälzkörper – immer schon im Spannungsfeld zwischen Sicherstellung der Tragfähigkeit und der gleichzeitig erwünschten Gewährleistung der Beweglichkeit. „Es muss nicht nur halten, es muss auch funktionieren“ – zumindest für den Bereich des Bauwesens war dieser Anspruch vergleichsweise neu²³⁹. Die Dimensionierung von Brückenlagern erfolgte somit vor allem – die heutige Terminologie nutzend – für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Damit einher ging die Notwendigkeit, sich auf die Elastizitätsgrenze des Materials zu beziehen - ein Ansatz, der sich im Wesentlichen erst im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts im Bauwesen etablieren konnte. Bis dahin hatte man üblicherweise die „absolute“ Zugfestigkeit eines Materials als Bezugsgröße angenommen. Der Bemessungsvorschlag SCHWEDLERS von 1861, der eine zulässige Belastung direkt auf die Elastizitätsgrenze des Materials bezog, war mit Sicherheit einer der ersten dieser Art²⁴⁰.

Die Einführung beweglicher Lager und damit die direkte Konfrontation der Brückenbauer mit den Phänomenen der Reibung waren erwartungsgemäß mit Problemen verbunden. Das Potenzial der Gleitlager wurde vielfach überschätzt, und sie galten oft noch als die bessere Alternative. Die Gründe hierfür dürften vielfältiger Natur gewesen sein. Zum einen entsprach der flächige Lastabtrag der Gleitlager mehr den gewohnten Denkmustern der Brückenbauer, zum anderen spielten sicherlich die anfangs noch begrenzten metallurgischen Möglichkeiten zur Herstellung hoch belastbarer Walzen eine Rolle. Darüber hinaus dürften sich die Vorteile der wälzenden Reibung gegenüber der gleitenden Reibung nur sehr zögerlich bis ins Bauwesen durchgesprochen haben. Es überrascht doch, dass 1882 PÉRISSÉ in Frankreich Versuche durchführen musste, um die ein Jahrhundert alte allgemeine Erkenntnis seines Landsmanns COULOMB auch für die Brückenbaupraxis zu erbringen.

Die teilweise sehr differenzierten Angaben von Reibungsbeiwerten in den Handbüchern der Mechanik (siehe Tab. 30) bedienten primär Fragestellungen aus dem Maschinenbau und spielten für den Brückenbau keine nennenswerte Rolle. Erst das „Lagerbuch“ WINKLERS von

²³⁹ Wenngleich es im Bereich des Bauwesens immer wieder auch bewegliche Bauteile zu dimensionieren gab, z.B. bewegliche Brücken unterschiedlicher Bauart, so standen – und stehen noch heute – primär Fragen der Tragfähigkeit im Vordergrund.

²⁴⁰ Erst ab den 1870ern begann die Einrichtung von Prüflaboren mit entsprechender Prüftechnik zur verlässlichen Bestimmung des beginnenden Materialfließens.

1875 zielte direkt auf die Probleme des Brückenbaus und sollte bis ins 20. Jahrhundert hinein den Entwurf von Brückenlagern beeinflussen. Mit den Empfehlungen vereinfachter, pauschaler Reibungskoeffizienten wurde insgesamt dem Stellenwert des Reibungsproblems innerhalb der Praxis entsprochen. Danach waren Ursache und Wirkung von Reibung zwar grundsätzlich zu beachten, immer jedoch auf einer qualitativen Ebene, denn eine Berücksichtigung der Reibungskräfte bei der Bemessung des Überbaus war nur selten erforderlich und bei der Bemessung der Auflagerbänke durch vereinfachte Werte völlig ausreichend.

6.2.8 Zusammenfassung

Neben den Arbeiten verschiedener Wissenschaftler zur Reibung führten insbesondere die umfangreichen Versuche von COULOMB und deren Veröffentlichung 1781 zu einem fundierten Wissensstand – sowohl zur gleitenden als auch zur wälzenden Reibung. Die technische Anwendung konzentrierte sich jedoch vorerst noch auf die Gleitlagertechnik²⁴¹, wo verbesserter Aufbau und Schmierung die in Mühlen- und Wagenrädern verursachte Zapfenreibung reduzieren sollte. Die noch tradierten Denkmustern anhängenden Brückenbauer sahen bis auf wenige Ausnahmen noch keine Veranlassung, die Steifigkeit ihrer Tragwerke durch den Einbau beweglicher Teile zu reduzieren. So erkannte zunächst auch niemand die Notwendigkeit für Versuche zur Reibung an Brückenlagern.

Die ersten Anwendungen beweglicher Lager im Brückenbau vertrauten noch dem Trial-and-Error-Prinzip. Die Grenzen empirischen Vorgehens waren jedoch zu Beginn der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erreicht und ebenso die Grenzen der Gleitlagertechnik. Die Lager hielten zwar, funktionierten aber schlichtweg nicht mehr. Die mit wachsender Spannweite auch zunehmende Reibung war nicht mehr schadlos durch Brückenüber- oder -unterbau aufnehmbar. Fragen der Gebrauchstauglichkeit rückten in den Fokus der Brückenbauer. Das letztere den Gleitlagern fehlte, gab den Anlass für die Einführung von Rollenlagern, wobei die anfänglichen Rollenlager mit all ihren Unzulänglichkeiten dazu führten, dass die Konstrukteure sogar bei großen Spannweiten teilweise noch Gleitlager bevorzugten. Erst die Kipplager konnten eine weitgehend gleichmäßige Belastung aller Wälzkörper gewährleisten. Parallel dazu führten verbesserte metallurgische Möglichkeiten im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts zum Einsatz höherwertiger – insbesondere härterer – Materialien für die Wälzkörper, was die Beweglichkeit der Lager steigerte.

²⁴¹ Obwohl Kugellager im heutigen Verständnis bereits im ausgehenden 18. Jahrhundert nachgewiesen sind [289/S.58f], [72/S.275], sollten sie sich in verbesserter Form erst mit dem sich entwickelnden Hochleistungsmaschinenbau im ausgehenden 19. Jahrhundert als Massenware durchsetzen [497].

Die Untersuchungen zum Reibungsproblem konkretisierten sich von allgemeinen Überlegungen über Gleitlager versus Rollenlager hin zu den Vorgängen in der Kontaktzone von Walze und Platte – zunächst in Frankreich. Erst im frühen 20. Jahrhundert widmeten sich auch in Deutschland Experimente der Reibungsproblematik. Aus heutiger Perspektive bildeten diese den Abschluss der versuchstechnischen Auseinandersetzung mit der gusseisernen und stählernen Brückenlagertechnik. Die Versuche nach dem Zweiten Weltkrieg thematisierten prinzipiell neuentwickelte, hochfeste Brückenlager. Ergänzende Untersuchungen zur historischen Lagertechnik hatten nur vergleichenden Charakter.

6.3 Ermüdung, Verschleiß

Während Fragestellungen zum Berührungs- und Reibungsproblem den konstruktiven Reifeprozess der gusseisernen und stählernen Brückenlagertechnik im 19. Jahrhundert begleiteten, hat sich das Bewusstsein für zeitabhängige Probleme erst aus der Retrospektive auf Jahrzehnte mitunter sehr intensiver Nutzung dieser nunmehr historischen Brückenlagertechnik entwickelt. Dabei standen in erster Linie Fragen zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit durch Verschleiß im Mittelpunkt der Untersuchungen, wohingegen Fragen zum Verlust der Tragfähigkeit durch Materialermüdung nur am Rande thematisiert worden sind.

6.3.1 Praktische Versuche

Die in Tab. 31 aufgeführten Experimente zu zeitabhängigen Einflüssen an Brückenlagern fanden ausschließlich im Ausland statt. Die in Deutschland vom VDI um 1900 initiierten Versuche thematisierten nur Fragen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Im Zuge der Auswertung 1915 wurde im Hinblick auf die Ermüdungssicherheit lediglich der noch völlig unbefriedigende Kenntnisstand festgehalten:

„Ob bei dauernder Beanspruchung unter gleich hohen Auflagerdrücken das Material Veränderungen erfahren würde, die zu Bedenken für die Sicherheit des Lagers Anlaß geben würden, lässt sich ohne eingehendere Versuche nicht beantworten“ [90/S.58].

Wenig später, 1919, forderte auch KOLLMAR Dauerversuche an Brückenlagern,

„[...] bei denen die Stöße und Lastwechsel, wie sie bei den in Eisenbahnbrücken eingebauten Lagern und Gelenken in Frage kommen, während längerer Zeit zum Ausdruck kommen. Es müsste sich dann zeigen, ob die Molekularzusammensetzung der in der Nähe der Berührungsfläche gelegenen, sehr hoch beanspruchten Stahlteilchen nicht in ungünstiger Weise verändert werden kann“ [57/S.62].

Nach Kenntnis des Verfassers sind entsprechende Versuche weder beantragt noch ausgeführt worden.

Tab. 31: Versuche zu Ermüdung und Verschleiß an Brückenlager

Jahr	Name	Ort	Fragestellung	Bereich	Verweis
ca. 1962	Unbenannt	Großbritannien	Eignung hochfester Rollen für Lagersättel von Hängebrücken	Hochfeste Edelstahl-Lagerwalzen	K5- 2
1964/ 1965	MEXE	Großbritannien	Einfluss dynamischer Belastungen auf die bei der statischen Bemessung zulässige Spannung	Gusseiserne Lagerwalzen nach BS 1452	K5- 3
1995	Schindler/ Morf	Schweiz	Klärung der gehäuft aufgetretenen Risse an Lagerwalzen	Hochfeste Edelstahl-Lagerwalzen	K5- 4

Bei den beiden Versuchsreihen in den 1960er-Jahren in Großbritannien stand der Verlust der Gebrauchstauglichkeit infolge wiederholter Belastung im Fokus – vgl. Tab. 31. Hatte die Veröffentlichung von 1962 zu den Versuchen an Lagersätteln werbenden Charakter und blieb ohne Erkenntniswert für diese Arbeit, so lassen sich aus den Versuchen des Military Engineering Experimental Establishment (MEXE) von 1964/65 interessante Schlüsse ziehen. Als Kernaussage mag gelten, dass nach 30.000 zyklischen Hin- und Herbewegungen²⁴² selbst unter dem Dreifachen der nach *British Standard BS 153* erlaubten zulässigen Belastung die Gebrauchstauglichkeit nicht signifikant beeinflusst wurde²⁴³. Tab. 32 integriert den Bemessungsansatz nach *BS 153* in die Bemessungspraxis in Deutschland im 20. Jahrhundert und verdeutlicht die im Vergleich konservative deutsche Wälzkörperbemessung.

Tab. 32: Auszug aus Tab. 25 mit Erweiterung um die Bemessung nach BS 153 von 1958

Jahr	Name	Walzengeometrie $n \cdot l \cdot r =$
1905	Tetmajer	25 A
1905	Vianello	10 A
1908	Schaper	11...14,5 A
1911	Bernhard	11...19,5 A
1922	Schaper	11...20,0 A
1923	Reichsminister	7 A
1937	DIN 1050	7 A
1958	BS 153 Part 3B	4,5 A ***
1990	DIN 18 800-1	7 A

*** BS 153 erlaubt eine Belastung von $zul_A \leq 0,7 \cdot d \cdot l$ [A in Tonnen; d und l in inch]

²⁴² Entspricht nach MEXE-Angaben einer Lebensdauer von etwa 80 Jahren.

²⁴³ Siehe dazu in [11/S.5], [74/S.3]. Walzen und Platten bestanden aus Meehanite-Gusseisen, einer handelsrechtlich geschützten Art von hochwertigem Gusseisen.

Das Ziel der Arbeit von SCHINDLER/MORF (1995) bestand darin, die Sicherheit und Lebensdauer der durch deutlich sichtbare, tiefe Risse geschädigten Edelstahlrollen zu beurteilen²⁴⁴. Da die Risse ausschließlich an Rollen aus vergütetem Chromstahl vorkamen, lagen ihre Ursachen in der speziellen Werkstoffwahl sowie in der thermischen Vergütung. Diese Faktoren lassen sich für die historischen gusseisernen und stählernen Lager ausschließen.

6.3.2 Theoretische Bemessung

Mit dem Wöhler- und dem Bruchmechanik-Konzept stehen dem Ingenieur heute effektive Werkzeuge zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit stählerner Bauteile zur Verfügung, die für die Bewertung bestehender Brücken auch Eingang ins aktuelle Normenwerk gefunden haben. Die genannten Verfahren können jedoch nicht ohne weiteres auch auf die dazugehörige Lagertechnik angewendet werden, denn Bauteilgeometrie sowie Material- und Struktureigenschaften lassen sich nicht oder nur in Einzelfällen vergleichen (Tab. 33).

Tab. 33: Vergleich der Bauteilparameter von historischen Überbauten und Lagern

	Überbauten für Brücken	Lager für Brücken
Geometrie	stabförmig, geringe Blechstärke	gedrungen und kompakt
Material	Schweiss- oder Flusstahl	Gusseisen oder Stahlguss, für die Wälzkörper auch hochwertiger, geschmiedeter Stahl
Struktur	Schweißstahl: lamellar, anisotrop, teilweise stark verunreinigt mit nichtmetallischen Einschlüssen Flusstahl: grobkörnig, isotrop	allgemein: Lunker, Seigerungen, Eigenspannungen möglich Gusseisen: mit groblamellaren Graphiteinschlüssen Stahlguss: variiert je nach Zusammensetzung und Wärmebehandlung, i.d.R. feinkörnig, isotrop

Dem Verfasser sind weder historische noch aktuelle Ansätze zur Berücksichtigung der Ermüdung bei der Bemessung von Brückenlagern bekannt.

6.3.3 Weitere Erkenntnisse und Ausblick

Verglichen mit dem Quellenfundus, den die vorliegende Arbeit sowohl zum Berührungs- als auch zum Reibungsproblem erstellen und auswerten konnte, ist die Zahl der Dokumente, die sich mit zeitabhängigen Einflüssen befassen, gering. Überlieferungen explizit zu Fragen der

²⁴⁴ „Bei diesem Lagertyp traten zu Beginn der 70er Jahre immer wieder unerklärliche Schäden in Form von Rissen auf“ [82/Vorwort].

Ermüdung an Brückenlagern sind dem Verfasser nicht bekannt geworden. Andererseits lassen sich auch generelle, also nicht direkt im Zusammenhang mit Brückenlagern gewonnene Einsichten zu materialtechnischen Problemen verwenden, um Fragen der Ermüdung theoretisch präziser zu fassen oder gar zu bestimmen.

- Randschichtverfestigung

Aufgrund der nutzungsbedingt im Bereich der Laufwege der Wälzkörper stattfindenden Randschichtverfestigung vereint das Gefüge der historischen Lager heute die positiven Eigenschaften eines duktilen Kerns mit einer deutlich härteren Kontaktfläche und nähert sich damit prinzipiell dem Wesen von Lagern mit Auftragschweißung, die für hohe Belastungen auf Grund negativer Erfahrungen mit Edstahllagern entwickelt worden sind (Abb. 98). Abgesehen von Vorteilen für die Tragfähigkeit, so beeinflussen Randschichtverfestigungen auch positiv die Dauerfestigkeit der Wälzkörper. Bereits 1929 wies OTTO FÖPPL²⁴⁵ den positiven Einfluss von Randschichtverfestigungen auf die Dauerfestigkeit dynamisch beanspruchter Bauteile nach. Ein großes Potenzial der Randschichtverfestigung sah FÖPPL für „[...] die harten, dynamisch spröden, d.h. wenig dämpfungsfähigen Baustoffe“ [309/S.577]²⁴⁶. Im Jahre 1991 widmete sich an der TH Darmstadt eine Dissertation der Schwingfestigkeit randschichtverfestigter eigenspannungsbehafteter Bauteile [491].

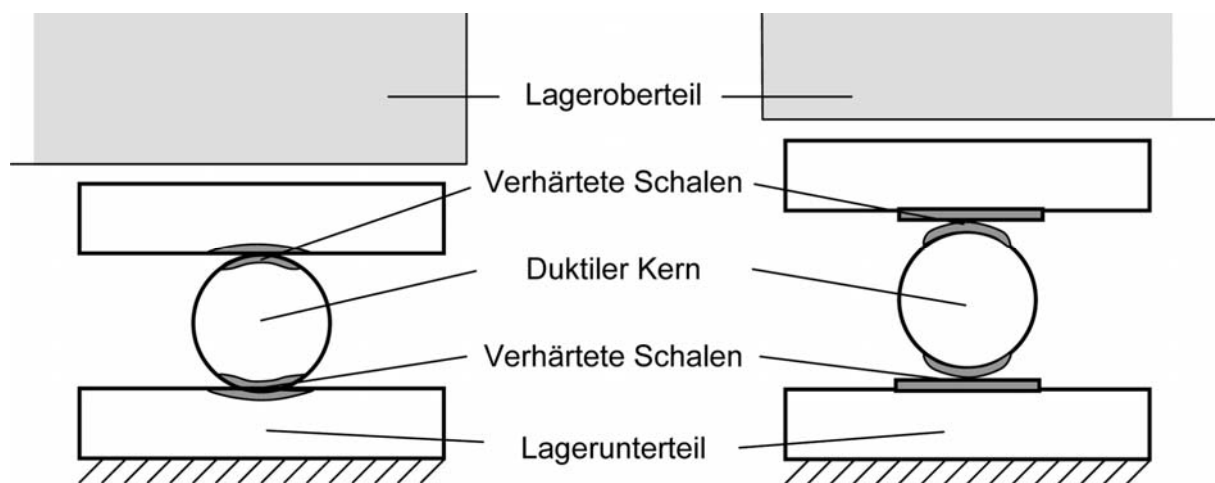


Abb. 98: Vergleich historischer Lager (links) mit Auftragsschweiß-Lagern (rechts)

²⁴⁵ OTTO FÖPPL (1885-1963).

²⁴⁶ Über erste Versuche, bei denen die Dauerfestigkeit an der Oberfläche gedrückter Stäbe um bis zu 15 % erhöht werden konnte, berichtete FÖPPL in [506/S.1090f]. FÖPPL erwarb in- und ausländische Patente auf entsprechende Verfahren zur Randschichtverfestigung; [333/S.51].

- Dauerfestigkeit Stahlguss

Grundsätzliche Aussagen zur Dauerfestigkeit von Stahlguss finden sich in der Literatur des Maschinenbaus. TAUSCHERS *Dauerfestigkeit von Stahl und Gusseisen* von 1969 schreibt:

„Unlegierter Stahlguss ist grundsätzlich in normalgeglühtem Zustand einzusetzen, da er im Gußzustand spröde ist und leicht zu Bruch geht. Trotz der Wärmebehandlung ist Stahlguss im Gegensatz zu durchgeknetetem und dadurch innerlich verdichtetem Walz- oder Schmiedestahl inhomogen. Durch Mikroporen oder andere vom Gußzustand herrührende Gefügestörungen sind die Festigkeitswerte von Stahlguss niedriger als von Stahl. Während die Streckgrenze und die Zugfestigkeit nur geringfügig niedriger liegen als bei Walz- oder Schmiedestahl, sind Dehnung und Zähigkeit bedeutend geringer“ [348/S.60].

Zusammen mit den Erkenntnissen aus Punkt 5.5 liegt der Schluss nahe, dass der Werkstoff Stahlguss praktisch nur normalgeglüht für Brückenlager verwendet wurde. Nennenswerte Eigenspannungen aus dem Herstellungsprozess sind nicht mehr zu erwarten. Gleichwohl werden sich durch die nutzungsbedingt entstandenen Randschichtverfestigungen Eigenspannungszustände aufgebaut haben, die zusammen mit Gefügestörungen und der eingeschränkten Duktilität bei weitergehenden Untersuchungen beachtet werden müssen.

- Potenzial für die Bemessung

Der heute im Maschinenbau gebräuchliche Ansatz mit einer Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Tragzahl bietet für die Berücksichtigung ermüdungstechnischer Einflüsse bei den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern keine Orientierung. Zu sehr unterscheiden sich diese von den Lagern des Maschinenbaus in Geometrie, Material und Belastung.

Einen interessanten Ansatz zur Beurteilung der Dauerfestigkeit von Brückenlagern bietet die in den 1990er-Jahren auf Grundlage ehemaliger TGL-Standards sowie der früheren Richtlinie VDI 2226 und weiterer Quellen erarbeitete FKM-Richtlinie *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*, die 2003 bereits in der 5. Auflage erschienen ist [448]. Die dort explizierte Nachweisführung bietet zum Beispiel die Möglichkeit,

- zwischen stabförmigen, flächigen und volumenförmigen Bauteilen zu unterscheiden (insofern kann die besondere Geometrie der Lagerbauteile berücksichtigt werden);
- örtliche Spannungen, z.B. aus einem Finite-Elemente-Modell, zu verwenden (insbesondere die Bauteilgeometrie der Lager ermöglicht praktisch keine Angabe einer das Bauteil repräsentierenden und über den Querschnitt konstanten Nennspannung);
- den Effekt der Randschichtverfestigung und den damit einhergehenden Eigenspannungszustand in die Berechnung explizit einfließen zu lassen.

Damit bietet die FKM-Richtlinie einen Ansatz zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit, der spezifischen Bedingungen dieser historischen Brückenlagertechnik prinzipiell Rechnung trägt. Zumindest für die Neubemessung von Lagerteilen, z.B. für Austauschteile im Zusammenhang einer Lagersanierung, bietet sich somit die Möglichkeit, Prognosen zur Ermüdungsfestigkeit zu treffen²⁴⁷. NÖLKE zum Beispiel nutzte in [333] den Ansatz für den Betriebsfestigkeitsnachweis von neu einzubauenden Laufrollen im Stahlwasserbau, die in Aufbau und Funktionsweise der historischen Brückenlagertechnik nahe stehen. Ob sich jedoch der Ansatz auch dazu eignet, den Ermüdungszustand historischer gusseiserner und stählerner Brückenlager beurteilen zu können, also die Auswertung eines lange genutzten Bestandes erlaubt, werden zukünftige Untersuchungen erst zeigen müssen.

6.3.4 Wertung und Zusammenfassung

Verglichen mit den Arbeiten zum Berührungs- und Reibungsproblem sind zeitabhängige Einflüsse an historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern kaum nennenswert beforscht worden. Trotz nur weniger zur Verfügung stehender Versuche offenbarte deren Auswertung jedoch ein prinzipielles Problem – die unterschiedliche Interpretation der einwirkenden Lastspielzahlen. Die Analyse früher amerikanischer Versuche durch WING im Punkt 7.2 wird noch zeigen²⁴⁸, dass sich jene zum Beispiel ausschließlich auf Bewegungen durch Zugüberfahrten bezogen²⁴⁹ [17/S.104]. Der *MEXE-Report* wiederum berücksichtigte nur Bewegungen durch den Tag-Nacht-Temperaturunterschied [74/S.1]. So ergaben sich völlig unterschiedliche Prognosen für die Lebensdauer der Brückenlager; beim *MEXE-Report* folgten aus nur einer täglichen Bewegung etwa 30 000 Bewegungen in 80 Jahren, WING dagegen kalkulierte mehr als das Doppelte (73 000 Bewegungen) allein innerhalb eines Jahres. Dabei ging er von 20 Zügen stündlich aus, von denen jeder einzelne etwa 10 Bewegungen verursachte.

Allein dieses unterschiedliche Herangehen zeugt von ungenügend aufgearbeiteten Grundlagen. In dieses Bild fügt sich die Tatsache, dass es offenbar bisher keine theoretischen Bemessungsansätze gegeben hat, welche – ausgehend von bekannten Versuchsergebnissen und unter Berücksichtigung praktischer Erfahrungen – durch weiterführende theoretische Betrachtungen zu begründeten Empfehlungen für die Bemessung von Brückenlagern führ-

²⁴⁷ Im aktuellen Regelwerk für Rollenlager *EN 1337-Teil 4* finden sich keine entsprechenden Angaben.

²⁴⁸ Die Versuche von WING werden im Abschnitt 7 im Kontext der Entwicklung in den USA thematisiert.

²⁴⁹ Da sich gewöhnlich die Kipp-Punkte der Brückenlager nicht in der Schwerachse des Überbaus befinden, erzeugt jede Durchbiegung des Überbaus eine entsprechende Translation des beweglichen Lagers.

ten. Rückblickend gab offenbar die Robustheit der nunmehr historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager über fast ein Jahrhundert keinen Anlass, ihre zuverlässige Funktion auch langfristig in Frage zu stellen. Wenngleich diese Lager ihr Dauerstandvermögen nachgewiesen zu haben scheinen, lassen sich daraus nicht jedoch zwangsläufig weitere Jahrzehnte Betriebssicherheit ableiten, insbesondere unter Berücksichtigung der inzwischen geänderten Verkehrsbelastungen und eventueller Alterungsprozesse im Material.

Gerade die spezifischen Verhältnisse der historischen Lagertechnik geben Anlass, das Ermüdungsproblem in Zukunft stärker als bisher in den Fokus der Untersuchungen zu stellen. WOLFRAM zum Beispiel verwies 2001 in seiner Dissertation [361] auf den schädigenden Einfluss sehr starker und lang anhaltender Druckschwellspannungen im Bereich von Bauteilkernen. Zwar bezog er seine Untersuchungen und Aussagen auf Materialien, wie sie typischerweise für Brücken überbauten verwendet wurden²⁵⁰, die Erkenntnis gilt jedoch aus Sicht des Verfassers sinngemäß auch für die historischen Brückenlager. An solchen treten planmäßig sehr hohe und im Kontaktbereich extrem konzentrierte Druckspannungen auf, mit denen quergerichtet vergleichsweise hohe Zugspannungen einhergehen. Zusammen mit den an gegossenem Material häufig auftretenden Strukturschwächen²⁵¹ sind prinzipiell auch für die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager die wesentlichen Voraussetzungen für Ermüdungsschäden gegeben.

²⁵⁰ Als Probekörper wurden Walzblechstahl St 37 sowie in geringem Umfang Proben aus Schweißseisen untersucht [361/S.57].

²⁵¹ Wie etwa die in historischem Gusseisen üblicherweise in lammellarer Form vorkommenden Graphiteinschlüsse oder die für Stahlguss typischen Lunken.

7 Gusseiserne und stählerne Brückenlager in den USA

Die in den USA bzw. in Nordamerika gebräuchlichen gusseisernen und stählernen Brückenlager unterschieden sich im Untersuchungszeitraum recht deutlich von denen in Deutschland oder in Europa. Charakteristisch waren zum einen die aus Halbzeugen zusammengenieteten Kipplager, zum anderen der Gebrauch vieler Rollen mit kleinem Durchmesser anstatt weniger Rollen größeren Durchmessers für die beweglichen Lager. Weiterhin fanden Pendellager verstärkt Anwendung, die zumindest in Deutschland kaum nennenswerte Marktanteile besaßen (Abb. 99).



Abb. 99: Melrose-Brücke, 1922; Links: Ansicht, Rechts: Pendellager – hier als Bolzen-Pendellager; [691]

Ebenso wenig hatte sich in Deutschland der Bolzen als Kippelement etablieren können²⁵². In Nordamerika jedoch bildeten Bolzen-Kipplager bis in das 20. Jahrhundert hinein einen festen Bestandteil des Brückenbaus in Eisen, vornehmlich begründet durch die dort verbreitete Anwendung und Tradition der Gelenkbolzenbrücken²⁵³. Doch die Fertigung der Bolzenlager unterschied sich deutlich von der in Deutschland bzw. in Europa üblichen. War hier auf Grund der Dichte und der Erfahrungen der Eisengießereien die Belieferung von Brückenbaustellen mit hochwertigem, gegossenem Lagermaterial kaum ein Problem, so übernahmen in Nordamerika die Brückenbauanstalten die Herstellung der Lagerkörper durch Rückgriff auf die üblichen zur Verfügung stehenden Halbzeuge. Das Kippelement – der Bolzen – ruhte dabei ...

²⁵² Vgl. dazu Abschnitt 4.3.2.

²⁵³ „Die Unterschiede gegenüber den europäischen Anordnungen rühren im Wesentlichen von der bekannten amerikanischen Bauart eiserner Brücken her, wobei weniger aus theoretischen, als aus rein praktischen Gründen – nämlich zur Erleichterung der Aufstellung in menschenarmen Gegenden – alle Knoten der Hauptträger als Bolzenknoten ausgebildet sind (pintrusses), während die europäischen Brücken (bei deren Aufstellung geschickte Arbeiter und Fachleute nie gefehlt haben) durchweg vernietete Knoten aufweisen“ [204/S.16]. Siehe dazu auch in [222].

„[...] in einem Lagerstuhl, der aus zwei bis vier senkrechten [...] Stegen besteht, die durch Winkel-eisen mit einer kräftigen Grundplatte verbunden sind. Er wird meist nur von zwei Blechen voll um-fasst, während er auf den übrigen nur in einem Halbkreise ruht“ [137/S.498].

Welche Dimensionen bei diesem Vorgehen erreicht werden konnten, verdeutlicht Abb. 100 mit einem Ausschnitt des insgesamt fast 6,20 m hohen Bolzen-Kipplagers der Québec-Brücke (1904-17) über den Sankt-Lorenz-Strom. Ab ca. 1900 jedoch fanden in Nordamerika mehr und mehr gegossene Lagerkörper Anwendung, entweder das Prinzip der Bolzen-Kipplager nachahmend oder in Form der in Deutschland üblichen Zapfen-Kipplager [137/S.497]. Das Beispiel der Fairfax-Brücke (1921) zeigt jedoch, dass genietete Bolzen-Kipplager noch lange alternativ für eiserne Brücken verwendet wurden. (Abb. 100)



Abb. 100: Links: Auflager der Québec-Brücke [137]; Mitte/Rechts: Fairfax-Brücke; Ansicht/Auflagerdetail [691/ Foto: Jet Lowe]

7.1 Bemessung der Wälzkörper

In den Vereinigten Staaten waren drei Ansätze gebräuchlich:

Gleichung 4:
$$W_s = C' \sqrt{d}$$

Gleichung 5:
$$W_s = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot w_s^3 \cdot r \cdot \left(\frac{r}{E_r} + \frac{r'}{E_p} \right)}$$

Gleichung 6:
$$W_s = Cd \quad \text{mit}$$

W_s = „sichere“ Auflast pro Längeneinheit für die Walzen,

w_s = „sichere“ Spannung in Rolle und Platte,

r' = Dicke der Platte, r = Walzenradius, d = Walzendurchmesser,

E_r, E_p = Elastizitätsmodul von Walze und Platte,

C', C = Konstanten (Erfahrungswerte) [17/S.119].

Gleichung 4 bildete in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die wohl gebräuchlichste Grundlage für die Auslegung von beweglichen Wälzlager [17/S.126,127]. Ihr verdankten die Lager in den USA die meist große Anzahl kleiner Rollen, da der Walzendurchmesser nur als Quadratwurzel Einfluss auf die zulässige Auflast ausübte (Abb. 101).

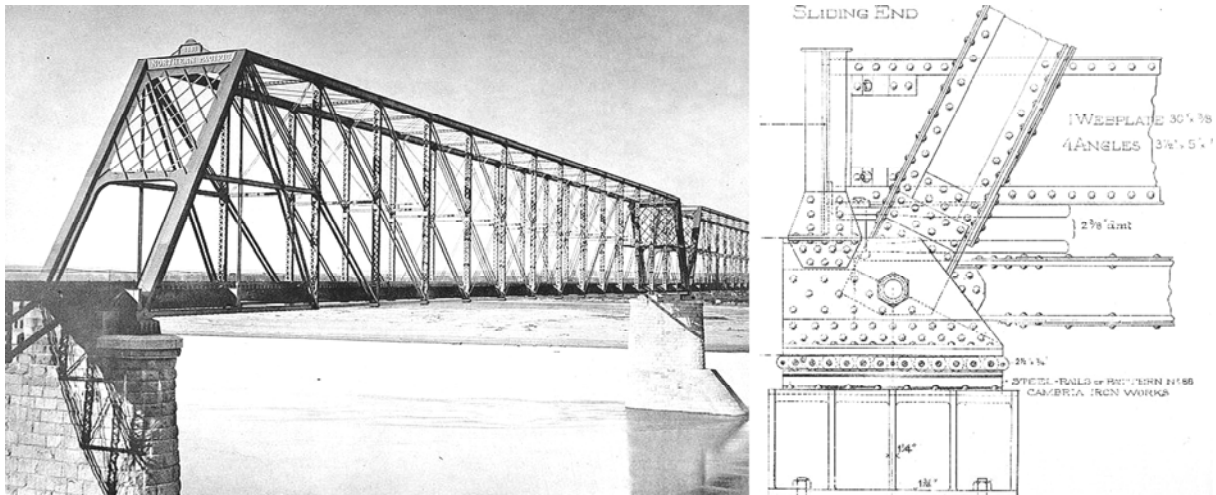


Abb. 101: Bismarck-Brücke von 1882 mit dem für Nordamerika typischen beweglichen Brückenlager: viele Lagerwalzen mit kleinem Durchmesser; Links: Ansicht, Rechts: Lagerdetail; [691]

Mit der Vielzahl kleiner Rollen erhöhte sich zum einen jedoch der Reibungswiderstand, zum anderen war die Gefahr größer, dass die Lager durch Ungenauigkeiten bei der Herstellung oder beim Einbau ihre Beweglichkeit verloren. Letzteres wurde bei Inspektionen so konzipierter Lager oft bestätigt [17/S.126] (Abb. 102). Erst zur Jahrhundertwende setzte sich die Zweckmäßigkeit größerer Walzen durch, so dass Gleichung 4 nach und nach aufgegeben wurde²⁵⁴ [137/S.328].

Bereits Mitte der 1870er-Jahre begann in der Fachliteratur der USA die Diskussion der dort als „Grashof formula“ bekannten Gleichung 5²⁵⁵. Sie gab den Anlass für die von JOHNSON²⁵⁶ um 1889 durchgeführten Versuche zu den Verformungen und Spannungen im Kontaktbereich (siehe Tab. 34). Für alle Beteiligten führten diese Untersuchungen zu der erstaunlichen

²⁵⁴ Beispiele für die eingesetzten Faktoren finden sich zum Beispiel in [129/S.393], [137/S.323].

²⁵⁵ Hier kam der Berechnungsansatz von FRANZ GRASHOF (1826-1893) offenbar zu unberechtigten Ehren. Nach [50/S.206] und [51/S.110] wurde Gleichung 5 von CHARLES MACDONALD durch Bezug auf „the Journal of German Engineers for April, 1874“ [68/S.140] in den USA eingeführt. Aller Wahrscheinlichkeit nach bezog er sich hierbei auf die Formel von KÜBLER, veröffentlicht in der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* von 1874 (vergl. K2- 7), welche der Gleichung 5 entspricht. Vielleicht war es der Ähnlichkeit der beiden Formeln von KÜBLER und GRASHOF zu verdanken, dass für diese später der Name des sehr viel bekannteren FRANZ GRASHOF übernommen wurde. GRASHOF selbst publizierte seinen Ansatz erst 1878 (vgl. K2- 11).

²⁵⁶ JOHN BUTLER JOHNSON (1850-1902).

Erkenntnis, dass unter Druck und bei behinderter Querdehnung die Elastizitätsgrenze des Materials nicht mit der beim Zugversuch ermittelten Elastizitätsgrenze vergleichbar sei²⁵⁷. Für die spezifischen Bedingungen im Kontaktbereich von Wagenrad und Schiene zum Beispiel vermutete JOHNSON das einsetzende Werkstofffließen bei Spannungen im Bereich von 200 000 pounds per square inch ($\sim 1400 \text{ N/mm}^2$) [51/S.207]. Bereits GRASHOF hatte bei der Herleitung seiner Formel darauf hingewiesen, dass die „E“ in seiner Formel „[...] nicht ohne weiteres den bekannten Elasticitätsconstanten gleich gesetzt werden dürfen, sondern einer besonderen erfahrungsmässigen Bestimmung bedürfen [...]“ [316/S.51]. Da er diese Werte schuldig blieb, fand seine Formel in Deutschland kaum Anwendung. In den USA jedoch galt die GRASHOF-Formel offenbar als eine der zuverlässigsten, wobei es üblich war, für „E“ die bekannten Elastizitätsmoduli einzusetzen [51/S.209].

Mit Gleichung 6 war in den USA auch der in Deutschland übliche Bemessungsansatz bekannt. Um Walzenanzahl und -länge erweitert, folgte $n \cdot l \cdot d = f \cdot A$, womit Gleichung 6 äußerlich den in Tab. 25 auf Seite 143 zusammengefassten Dimensionierungsvorschlägen entsprach. Nach [137/S.328] waren für den Faktor f Werte zwischen 20,8 und 41,7 üblich.²⁵⁸ Auf Grundlage von über viele Jahre andauernden und im Folgenden zu diskutierenden Versuchen wurde Gleichung 6 bei der zusammenfassenden Veröffentlichung der Erkenntnisse in den USA für die Bemessungspraxis empfohlen. Im Gegenzug sollte Gleichung 4 wegen der oben genannten Gründe aufgegeben werden [17/S.126].

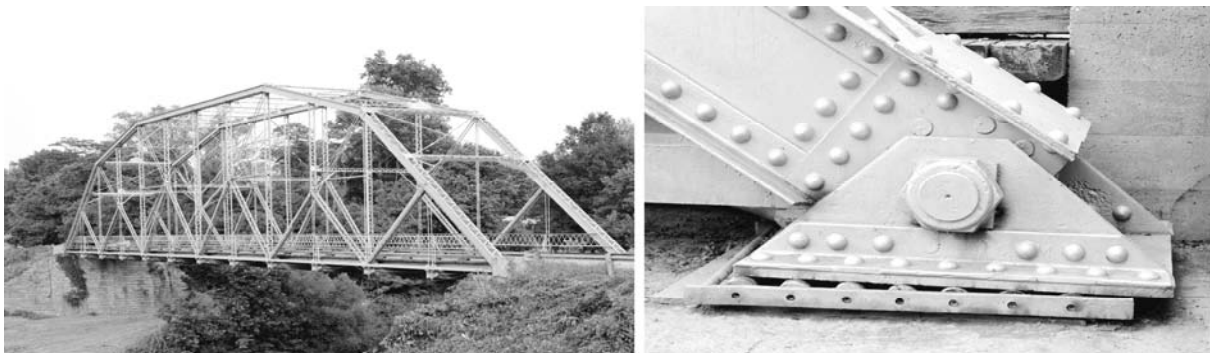


Abb. 102: Starnes-Brücke von 1890; Links: Ansicht, Rechts: Lagerdetail [691], das Foto vermittelt deutlich den Eindruck einer gestörten Funktion des beweglichen Lagers

²⁵⁷ „Here is where we have all been blundering. There is no such thing as an unconditioned elastic limit in compression as there is in tension“ [51/S.207].

²⁵⁸ Der Autor von [137] gab die Einheit „Tonnen“ für die Auflast an, blieb jedoch die Einheit für die Walzengeometrie schuldig. Hierfür „Zentimeter“ angenommen, lägen die Werte in dem auch in Deutschland üblichen Bereich.

7.2 Versuche

Tab. 34: Versuche in den USA an Lagern

Jahr	Name	Fragestellung	Bereich	Verweis
1889	Johnson	Verformungen, Spannungen	Eisenbahnbau	K1- 5
1886	Marston, Crandall	Reibung von Rollenlagern	Brückenbau	K3- 2
1887	Wing, McKim	Dauerstandvermögen		K5- 1
1893		Spannungen innerhalb der Körper		K1- 9
1893		Spannungen innerhalb der Körper		K1- 10
1893		Verformungen im Kontaktbereich, Abhängigkeit der Tragfähigkeit		K1- 11
1894		Spannungen im Kontaktbereich, Abhängigkeit der Tragfähigkeit		K1- 13
1921	Whittemore, Petrenko	zulässige Belastung und Anfangsreibung	Maschinenbau	K1- 20

Bereits vor den zur Jahrhundertwende in Deutschland groß angelegten und über Jahre dauernden Versuchen des VDI fanden in den USA durch CRANDALL, MARSTON, WING und MCKIM umfangreiche Versuchsreihen an größeren Auflagern statt (vgl. Tab. 34). Die Ergebnisse wurden 1894 zusammenhängend in den *Transactions* der American Society of Civil Engineers veröffentlicht, sie blieben aber in Deutschland nahezu unbekannt²⁵⁹. Diese zwischen 1886 und 1894 durchgeführten Versuche thematisierten im Prinzip alle wichtigen Probleme der gusseisernen und stählernen Brückenlager:

WING untersuchte 1886 im Rahmen seiner studentischen Abschlussarbeit den Materialeinfluss auf die Reibung an gebrauchten Lagerkörpern. Als reibungsärmste Kombination ergab sich bei ihm die Paarung „gusseiserne Rollen/stählerne Platten“ (K3- 2).

Im Anschluss prüfte er an einer Reihe zur Verfügung stehender Brückenlager, inwieweit Material und Belastung die Abnutzung der Wälzkörper und darüber hinaus die Funktionstüchtigkeit der Brückenlager beeinflussten. Die Auswertung der Versuche beschränkte sich auf eine sprachliche Beschreibung der Beobachtungen und den Versuch, aus den Erkenntnissen im Labor auf die Folgen am realen Bauwerk zu schließen²⁶⁰. Als Kernaussage blieb festzuhal-

²⁵⁹ KOLLMAR erwähnte zwar 1919 diese Versuche in seinem Buch zur Lagertechnik, aber nur in einem Nebensatz, da die Ergebnisse ihm selbst nur andeutungsweise bekannt waren [57/S.60].

²⁶⁰ Die Schädigungsabfolge wurde von WING wie folgt beschrieben: "The wearing effect was towards a gradual rusting of the surface, which changed to a blackening, accompanied with black dust of worn-out material as the wear increased; finally, pitting of the surface took place, with a flow of metal at the ends of the rollers and around the edge of the contact portion of the plate" [17/S.102].

ten, dass unter praxisrelevanten Bedingungen die Lager möglicherweise bereits nach wenigen Jahren ihre Funktionstüchtigkeit verlieren könnten – und dabei bliebe der Einfluss von Schmutz und Rost noch unberücksichtigt (K5- 1). Nennenswerte Rückschlüsse zum Einfluss von Walzendurchmesser, Belastung und Material auf den Verschleiß am Lagermaterial waren WING nicht möglich²⁶¹.

MARSTON/CRANDALL bedienten sich 1893 zweier innovativer Ansätze, um für weiterführende Betrachtungen Hinweise auf die Spannungssituation innerhalb der Lagerwalzen zu gewinnen. An Versuchen mit Glas nutzen sie die Tatsache, dass mit polarisiertem Licht der Spannungszustand belasteter lichtdurchlässiger Körper sichtbar gemacht werden kann. (K1- 9) Die Form der sich ausbildenden Farbbänder gab einerseits Aufschluss über die Entwicklung der Spannungssituation innerhalb der Walzen bei steigender Belastung. Die Farbverteilung andererseits erlaubte Folgerungen im Hinblick auf die jeweilige Spannungsintensität (Abb. 103).

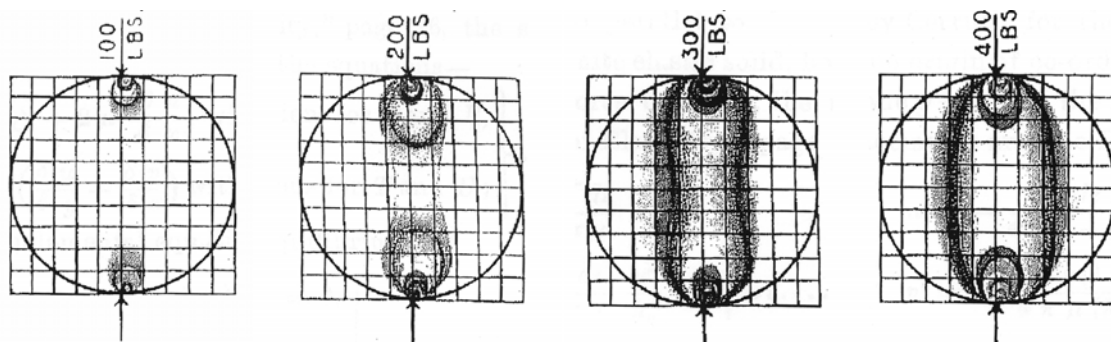


Abb. 103: Spannungsoptische Darstellung innerhalb eines zylindrischen Glaskörpers bei schrittweiser Erhöhung der Belastung [17]

Um diese an spröden Glaskörpern gewonnenen Erkenntnisse für gebräuchlichen Stahl zu bestätigen, wurden kurze stählerne Rollen so hoch belastet, dass mit Sicherheit die Elastizitätsgrenze des Materials überschritten wurde (K1- 10). An den Stirnseiten konnten die Fließlinien sichtbar gemacht werden²⁶². Diese bestätigten prinzipiell die vorher gewonnenen Resultate an optischem Glas. Darüber hinaus nahmen sie Erkenntnisse vorweg, die FÖPPL erst in den 1930er-Jahren durch Versuche für Deutschland erbringen sollte²⁶³ (Abb. 104).

²⁶¹ Hierzu die Einschätzung von WING: „It is not felt that these experiments will give more than a hint at the effect of diameter, load and material upon the wear of rollers“ [17/S.104].

²⁶² „The sides of the bars were polished, and light was reflected on them from a mirror“ [17/S.119].

²⁶³ Vergleiche dazu Abschnitt 6.1.3.

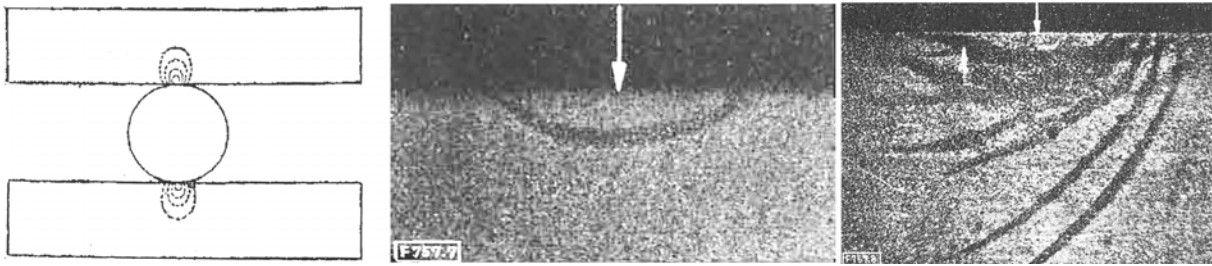


Abb. 104: Fließlinien im Inneren eines von einer Walze gedrückten Körpers; Aus den Versuchen - Links: von MARSTON und CRANDALL [17], Mitte/Rechts: von FÖPPL, erzeugt mit einem Walzenradius von 20 cm und einem spezifischen Walzendruck von 1600 kg/cm (Mitte) und 2500 kg/cm (Rechts) [306]

Noch im selben Jahr, 1893, prüfte MCKIM, inwieweit sich der von der GRASHOF-Formel suggerierte Einfluss der Lagerplattenstärke durch Experimente bestätigen lasse (K1- 11). Diese und weiterführende Versuche 1894 von MARSTON wurden bis zum Bruch der Walzen geführt. Abb. 105 zeigt einen Auszug der Ergebnisse, der gleichzeitig die direkte Abhängigkeit der Bruchlast vom Walzendurchmesser veranschaulicht.

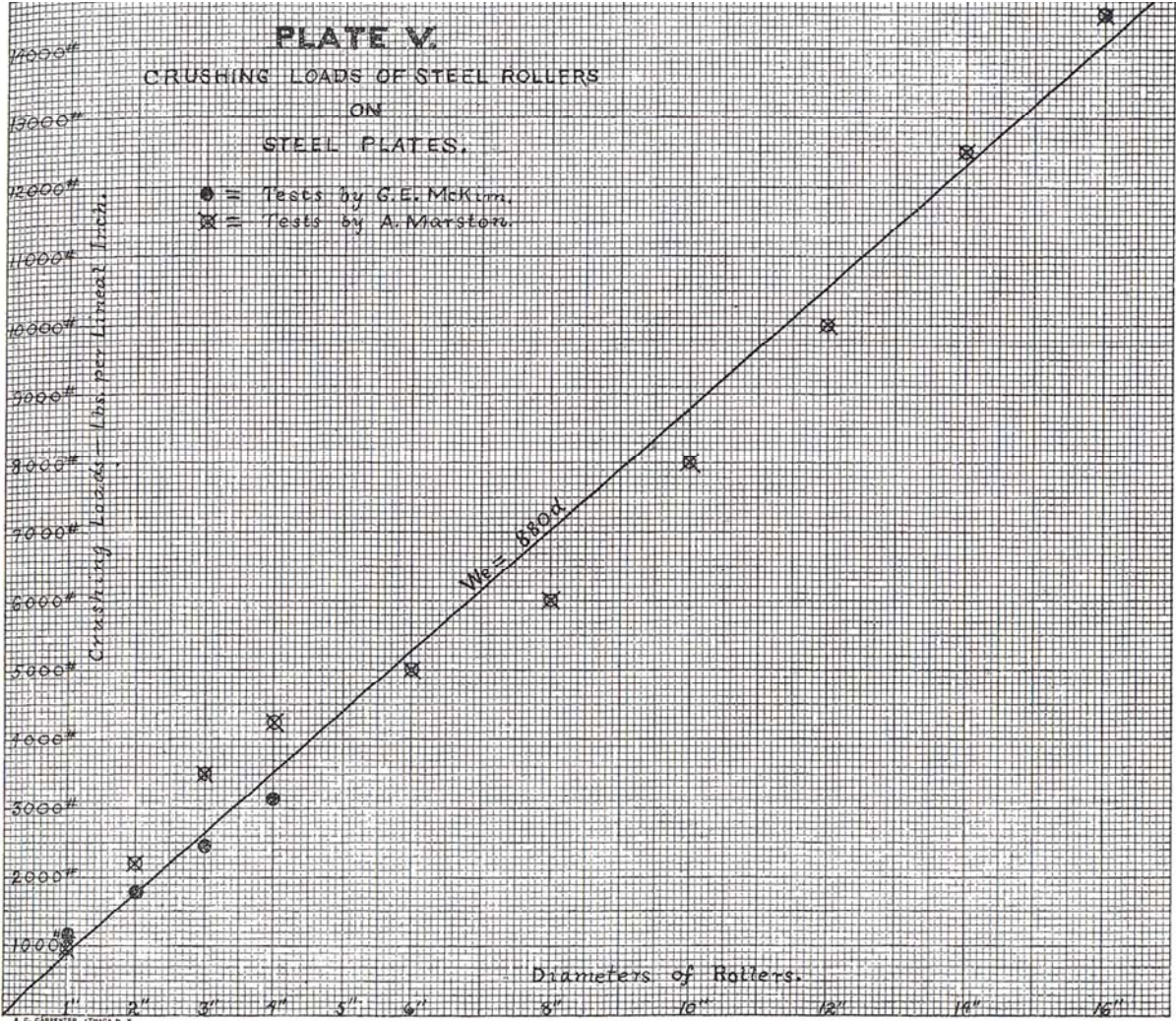


Abb. 105: Bruchlasten von stählernen Walzen [17]

Die genannten Experimente bildeten zusammen mit ergänzenden theoretischen Überlegungen die Grundlage dafür, auch in den USA die in Deutschland erprobte Gleichung 6 für die Lagerbemessung zu empfehlen. Gleichung 6 korreliert mit den Ergebnissen in Abb. 105 durch die direkte Abhängigkeit des Walzendurchmessers von einer Konstante. Wie Abb. 105 verdeutlicht, ließ sich die Bruchlast abbilden durch

Gleichung 7: $W = 880 \cdot d$,

...d.h. Konstante $C = 880$ lbs per inch of the roller [17/S.125]. Bei seiner Empfehlung für eine „sichere“ Belastung nahm MARSTON Bezug auf eine praxisübliche Bemessung von

Gleichung 8: $W_s = 250 \cdot d$ [17/S.126f],

...was gegenüber der Bruchlast einem globalen Sicherheitsfaktor von 3,5 entsprach. Wird diese Gleichung in die aus Abschnitt 6.1.2 vertraute Form mit den Einheiten „t, cm“ umgestellt, folgt

Gleichung 9: $n \cdot l \cdot r = 28,5 \cdot A$,

...womit die Empfehlung von MARSTON – verglichen mit Abb. 90 – etwa der damals auch in Deutschland üblichen Dimensionierungspraxis entsprach.

Wie in Deutschland, so kamen auch in den USA die Fragestellungen nach der Jahrhundertwende aus dem Maschinenbau²⁶⁴.

7.3 Wertung und Zusammenfassung

Die amerikanischen Versuche thematisierten bereits alle wesentlichen Fragen zur Lagerbemessung, wie das Dauerstandvermögen der Lager, das Reibungsproblem, aber auch die Vorgänge im Kontaktbereich – insgesamt eine Arbeit von hohem praktischen Nutzen [17/S.271]. Eine Anzahl von Versuchsreihen kombiniert mit theoretischen Überlegungen verfolgte das Ziel, die gängige Bemessungspraxis in den Vereinigten Staaten zu diskutieren und aus den Erkenntnissen konkrete Empfehlungen für die Ingenieurpraxis abzuleiten. Mittels der geschilderten spannungsoptischen Untersuchungen gelang dabei erstmals auch eine Visualisierung der Vorgänge innerhalb der Wälzkörper und damit eine Qualität der Veranschaulichung, wie sie uns in ähnlicher Form erst heute die Finite-Elemente-Methode ermöglicht.

²⁶⁴ Die 1921 in den USA durchgeführten Versuche thematisierten einen speziellen Anwendungsfall. Vom Navy Department war die Untersuchung des Reibungs- und Tragverhaltens von Rollen- und Kugellagern der Waffentechnik in Auftrag gegeben worden – in diesem Fall die Auswirkungen einer plötzlich auftretenden Maximalbelastung beim Abfeuern einer Waffe auf die Kugellagerung eines Geschützturms [106/S.4].

Im Prinzip bildeten die Untersuchungen in den USA einen „gemeinsamen Nenner“ zwischen zwei bislang in Deutschland (hier stellvertretend für große Teile Europas) und den USA (hier stellvertretend für Nordamerika) getrennt verlaufenden Entwicklungen, in denen für gusseiserne und stählerne Brückenlager eigene spezifische Formen entwickelt worden waren. Mit Bezug auf die Walzendimensionierung flossen beide Stränge nun zusammen, indem die Untersuchungen in den USA nicht nur die dort übliche Bemessung, sondern explizit auch den in Deutschland üblichen Ansatz diskutierten und in Auswertung der Arbeiten diesen für die Bemessungspraxis in den USA empfahlen. Damit konnte sich fortan die Lagerdimensionierung in den Vereinigten Staaten nicht nur auf die dortigen wissenschaftlichen Untersuchungen berufen. Zudem wurde sie durch viele Jahre praktischer Erfahrung in Deutschland abgesichert. Im Umkehrschluss lässt sich für Deutschland festhalten, dass die hierzulande oft gescholtene Bemessungspraxis auf der Basis einfacher Faustformeln durch die Erkenntnisse in den USA vor der Jahrhundertwende legitimiert werden konnte.

8 Zusammenfassung

Die Geschichte der Brückenlager ist die Geschichte eines Details, dessen Entwicklung den technischen Fortschritt der letzten zwei Jahrhunderte widerspiegelt. Taktgeber ist der Brückenbau gewesen, denn hier verlangten immer größere Tragwerke mit stetig wachsender Belastung die passende Antwort an der Schnittstelle zwischen Überbau und Unterbau.

Die ersten Brückenlager waren noch einfach; hölzerne Schwellen genügten lange den bescheidenen Ansprüchen an Brückenlager. Bald jedoch reifte, angetrieben durch den Eisenbahnaufschwung des 19. Jahrhunderts, eine eigenständige Brückenlagertechnik mit einer individuellen Konstruktionsprache heran. Mit Bolzen, Walzen und Zapfen hielten Elemente des Maschinenbaus Einzug in den Brückenbau, und das Bauwerk, „[...] vordem ein unbewegter starrer Körper, wird als bewegliche Maschine erkannt“ [196/S.1]. Die im Sog dieser Entwicklung entstandenen gusseisernen und stählernen Lager sollten bis weit ins 20. Jahrhundert im Brückenbau dominieren – zuerst als Flächenlager, später als Kipplager. Selbst in der Nachkriegszeit bediente man sich beim Wiederaufbau zerstörter Brücken möglichst der alten Lager, die dank ihrer Robustheit oft geborgen und wieder verwendet werden konnten.

Die gedrungene und kompakten Teile der eisernen Brückenlager wurden weitgehend aus gegossenem Material hergestellt, wobei der Stahlguss bereits im 19. Jahrhundert begann, das Gusseisen als vorherrschendes Lagermaterial abzulösen. Geschmiedeter Stahl blieb gegebenenfalls der Herstellung der hoch belasteten Wälzkörper und Zapfen vorbehalten. Im 20. Jahrhundert gab es noch Bestrebungen, das Prinzip dieser Lager mit vermeintlich besserem Material umzusetzen. Diese waren aber mit teilweise ernsthaften Rückschlägen verbunden. Erst die Etablierung neuer Werkstoffe führte zu einem Generationswechsel in der Lagertechnik – die Generation der gusseisernen und stählernen Brückenlager wurde sukzessive durch die der Verformungslager und der Kunststoff-Gleitlager abgelöst.

Der eigentliche Entwicklungsprozess der eisernen Brückenlagergeneration fand in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts statt. Er ging zeitlich einher mit weit reichenden Umwälzungsprozessen, sowohl in der Gesellschaft als auch im Bauwesen. Die deutsche Brückenbaukunst, vordem eher unbedeutend, konnte insbesondere zu statisch-konstruktiven Kriterien Impulse setzen – so auch die Entwicklung der gusseisernen und stählernen Lager entscheidend prägen. Die bis zum ausgehenden 19. Jahrhundert bereits herangereifte Lagertechnik gewährleistete bei Bedarf sowohl eine allseitige Verschieblichkeit als auch die allseitige Kippung des Überbaus und sollte bis zu ihrer Ablösung nur noch im Detail Veränderungen erfahren. Mit dem um 1900 eingeführten HERTZ'schen Bemessungsansatz schien vor-

erst eine befriedigende Dimensionierung der kritischen Kontaktbereiche zwischen Wälzkörpern und Lagerplatten gewährleistet.

Nach der Wende zum 20. Jahrhundert jedoch entzogen die sich ändernden politischen und wirtschaftlichen Bedingungen bald den Rahmen für nennenswerte Forschungen zu den gusseisernen und stählernen Brückenlagern. Die im 19. Jahrhundert teilweise lebhaft diskutierte Erkenntnisgewinnung in den Fachzeitschriften verlagerte und begrenzte sich zusehends auf eine Erkenntnisvermittlung in den Fachbüchern. Auf Grund des nachlassenden wissenschaftlichen Interesses sollte sich in Form der HERTZ'schen Gleichungen ein Forschungsstand manifestieren, der prinzipiell ins 19. Jahrhundert datiert.

Aus diesem zunehmenden Bedeutungsverlust der gusseisernen und stählernen Lager im 20. Jahrhundert – zunächst für Forschung und Entwicklung, in der zweiten Jahrhunderthälfte auch für die Anwendung – ergab sich schließlich keine Notwendigkeit mehr, die entstandene Lagervielfalt typologisch zu erfassen und zu ordnen. So ist die Benennung einzelner Lagertypen bis heute vom Zugang der jeweiligen Autoren abhängig geblieben. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellte Typologie ermöglicht künftigen Autoren erstmals eine schlüssige konstruktive und begriffliche Einordnung der Lager dieser Generation.

Vielleicht bildete der genannte Bedeutungsverlust auch den Hintergrund für den Abbruch der Normierungsarbeiten zu den eisernen Brückenlagern in den Zwischenkriegsjahren. Diese Arbeit wurde erst nach dem Zweiten Weltkrieg zunächst in der DDR fortgesetzt und zu einem nennenswerten Abschluss gebracht. Die in der „alten“ Bundesrepublik vergleichsweise spät einsetzenden Normierungsbemühungen zu Brückenlagern behandelten die gusseisernen und stählernen Brückenlager nur noch beiläufig. Sie thematisierten vielmehr die bauaufsichtliche Regelung der neuen Generation der Verformungslager und der Kunststoff-Gleitlager, die ohne kritische Kontaktpressungen alle erforderlichen Relativbewegungen zwischen Überbau und Unterbau bei grundsätzlich flächigem Lasttransfer realisieren konnten. Die neuralgischen Punkte der Vorgänger – die hohe Kontaktpressung bzw. Reibung – existierten hier nicht. Deshalb verschwanden die gusseisernen und stählernen Lager sukzessive aus dem Ingenieurbau, den Fachbüchern, dem Normenwerk und schließlich auch aus der öffentlichen Wahrnehmung.

Für die Bauingenieure zumindest sind die nunmehr historischen eisernen Brückenlager inzwischen zurück ins Blickfeld gerückt, denn angesichts der Zunahme der Sanierungs- und Ertüchtigungsarbeiten an bestehenden Brückenbauwerken muss auch der Zustand der vorhandenen Lager kritisch beurteilt werden. Der Mangel an verlässlichen Grundlagen bezüglich einer statisch-konstruktiven Beurteilung gab Anlass für die vorliegende Arbeit, die zu diesem Zweck die maßgeblichen Problembereiche der beweglichen Lager fokussierte – das

Berührungs- und das Reibungsproblem. Letzterem begegneten der zunehmende Verzicht auf Gleitlager selbst für kleinere Bauwerke sowie der Trend hin zur Verwendung möglichst weniger, dafür großer Wälzkörper um 1900. Das Berührungsproblem sollte etwa zeitgleich mit dem HERTZ'schen Bemessungsansatz eine wissenschaftlich fundierte Lösung finden.

Diese Erkenntnisse zur Jahrhundertwende waren zwar wertvoll, ergänzten letztlich aber nur einen schier unerschöpflichen Fundus aus inzwischen jahrzehntelanger Erfahrung beim Bau von eisernen Brückenlagern, von dem der Brückenbau noch im 20. Jahrhundert profitieren konnte. Dabei stand die Dimensionierung der Wälzkörper von Anbeginn im Spannungsfeld zwischen Sicherstellung der Tragfähigkeit und(!) der Gebrauchstauglichkeit. „Es muss nicht nur halten, es muss auch funktionieren!“ Für das Bauwesen war dieser Anspruch vergleichsweise neu. Neu war auch die Bezugnahme auf die Elastizitätsgrenze des Materials, um die geforderte Kinematik der beweglichen Teile nicht durch zu hohe Verformungen zu gefährden. Der Bemessungsvorschlag SCHWEDLERS von 1861, der eine zulässige Belastung direkt auf die Elastizitätsgrenze des Materials bezog, war mit Sicherheit einer der ersten dieser Art.

Fragen von Verschleiß und Ermüdung sind im Wesentlichen erst aktuell nach Jahrzehnten teilweise intensiver Nutzung ein Gegenstand der Forschung geworden. Historische Grundlagen hierzu, seien es Versuche oder theoretische Erörterungen, fanden sich kaum.

Doch gerade Fragen zu Ermüdung und Verschleiß werden sich hinreichend nicht ohne Rückbesinnung auf das Wesen der eisernen Brückenlagergeneration beantworten lassen. Diese Lager waren keine gewöhnlichen Bauteile des Bauwesens – es waren Maschinen, entwickelt von Technikern, die oft selbst Maschinenbauer waren, zumindest aber der Tradition des Maschinenbaus näher standen, als Bauingenieure es heute tun. Auf Grund der geforderten Kinematik dieser Maschinen umfassen die zeitabhängigen Einflüsse nicht allein Fragen der Materialfestigkeit, sondern auch solche der Funktionstüchtigkeit und vereinen somit Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit in einer für Bauingenieure heute ungewohnten Schärfe.

Diese Nähe der historischen Lager zum Maschinenbau ist sicherlich einer der Gründe dafür gewesen, dass die Lager bei der Begutachtung bestehender Brücken von Bauingenieuren bisher kaum thematisiert worden sind. Ungeachtet eventueller Berührungsängste jedoch sind die historischen Lager als fester Bestandteil noch bestehender Brückenbauwerke ein wesentlicher Teil einer Erbmasse im Zuständigkeits- und Verantwortungsbereich der Bauingenieure. Der Verfasser hofft, mit der vorliegenden Arbeit die Grundlagen und damit die Voraussetzungen für eine Annäherung bereitgestellt zu haben.

9 Ausblick

Die vorliegende Arbeit widmete sich der Aufarbeitung der historischen Grundlagen der Lagerentwicklung, insbesondere mit Bezug auf die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager. Damit bildet sie eine wesentliche Grundlage für ein gemeinsam vom Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung der BTU Cottbus und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin betriebenes Forschungsprojekt, welches auf die Erarbeitung verlässlicher Bewertungsmethoden für die gusseisernen und stählernen Brückenlager im Bestand zielt. Das Vorhaben begann zum Jahreswechsel 2009/2010, wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert und ist auf eine Laufzeit von 3 Jahren ausgelegt.

Die Recherche nach Vorschriften und Regelwerken für die Bearbeitung des Abschnitts 5.3 war aufwändig und nicht in jedem Fall erfolgreich. Insgesamt konnte jedoch eine ganze Anzahl historischer Vorschriften zusammengestellt werden, die eine solide Grundlage für die Bearbeitung des genannten Abschnitts bildeten.

Aus den Erfahrungen mit der aufwändigen Recherche entstand die Idee, historische Vorschriften anderen Wissenschaftlern durch eine online-Datenbank einfach und schnell zur Verfügung zu stellen. Eine entsprechende Homepage wurde 2009 unter der Verantwortung des Verfassers technisch konzipiert und ist als Arbeitsstand unter www.hivobau.de einsehbar. Einige wenige Dokumente sind exemplarisch bereits zum Herunterladen verlinkt. Die Erstellung entsprechender PDF-Dokumente mit einheitlichem Standard wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Die endgültige Bearbeitung jedoch, einschließlich des Layouts, ist für 2010 vorgesehen.

Die Website soll vorerst zur Verfügung stehende Regelwerke chronologisch auflisten, ohne dabei eine thematische Gliederung anzustreben. Nutzer haben so die Möglichkeit, für eine bestimmte Periode in einfacher Form nach Vorschriften jeglicher Art zu recherchieren. Schrittweise sollen in Zukunft die bereits aufgeführten Regelwerke zum Brückenbau in Eisen und Stahl auch durch Vorschriften zu anderen Themen ergänzt werden, wobei der Schwerpunkt weiterhin auf Vorschriften zum konstruktiven Ingenieurbau liegen soll. Mittelfristig ist eine thematische Gliederung der Sammlung denkbar – je nach dem, wie sich der Fundus im Laufe der Zeit entwickelt. Langfristig ist durchaus auch eine Erweiterung der Homepage über den deutschsprachigen Raum hinaus vorstellbar.

Zur Geschichte der Brückenlager im Allgemeinen als auch zu den gusseisernen und stähler-
nen Brückenlagern im Speziellen gäbe es noch viel zu sagen bzw. zu schreiben. Während
der Recherche oder während der Gespräche mit Kollegen und mit den Gutachtern eröffneten
sich immer wieder neue Themenfelder, die einer Bearbeitung wert gewesen wären. Hier sei
zum Beispiel die von Dr.-Ing. KARL-EUGEN KURRER angeregte technikwissenschafts-
historische Einordnung der Brückenlagerentwicklung erwähnt, die auf Grund ihrer vielen Pa-
rallelen – zum Beispiel zur Geschichte der Baustatik – ein spannendes Kapitel dieser Arbeit
ergeben hätte. Darüber hinaus wäre es interessant zu erfahren, was ROBERT SCHÖNHÖFER
mitten in der Zeit des Nationalsozialismus und praktisch ein halbes Jahrhundert nach dem
Ende der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Brückenlagern zu seinen intensiven
Forschungen veranlasste. Der anvisierte inhaltliche und zeitliche Rahmen für die Bearbei-
tung der Dissertation ließ jedoch diese und andere Exkurse nicht zu. Der Verfasser hofft, im
Rahmen späterer Veröffentlichungen noch einige interessante Kapitel zur Geschichte der
Brückenlager nachreichen zu können.

10 Literatur

Vorbemerkungen

Die Vielfalt der verwendeten Quellen legte es nahe, diese innerhalb der bibliographischen Auflistung nach bestimmten Kriterien zu sortieren. Dem Leser wurde somit die Möglichkeit geschaffen, einen schnellen Überblick über das dieser Arbeit zu Grunde liegende Quellenmaterial zu bekommen. Die Quellen wurden wie folgt gegliedert:

- Lager –
Zusammenstellung aller unmittelbar die Lagertechnik betreffenden Quellen,
- Brückenbau, Hochbau, Baukonstruktionen –
Zuordnung aller Quellen zum baukonstruktiven Umfeld,
- Statik, Mechanik, Material –
Zuordnung der theoretisch sowie materialtechnisch ausgerichteten Quellen,
- Regelwerke –
Auflistung der Quellen zum bauaufsichtlichen Umfeld,
- Kontext –
Zusammenstellung aller im erweiterten Kontext genutzten Quellen,
- Patente –
Auflistung von im Untersuchungszeitraum in Deutschland, England, Frankreich und den USA erteilten Patenten zur eisernen Lagertechnik,
- Sonstige –
geordnete Auflistung weiterer Quellen, z.B. Nachschlagewerke, Archive, mündliche oder schriftliche Auskünfte.

Die Zusammenstellung erfolgte in alphabetischer Folge der Verfasser oder Herausgeber bzw. – bei den Regelwerken und Patenten – in chronologischer Abfolge ihres Erscheinens.

Die Angabe der Namen der Verfasser oder Herausgeber erfolgte wie von diesen in der betreffenden Quelle angegeben, z.B. FRAENKEL – nicht FRÄNKEL, ohne Angabe akademischer Grade. Die Vornamen wurden abgekürzt. Wurde in der Quelle nur der Nachname des Verfassers benannt, so ist konsequenterweise die Quelle ohne Angabe des Vornamens zitiert worden – ungeachtet, ob dieser bekannt war.

Lager

- [1] Andrä, W.: Der heutige Entwicklungsstand des Gummitopflagers und seine Weiterentwicklung zum Hublager. Bautechnik 61 (1984), S.222-230.
- [2] Andrä, W.; Leonhardt, Fr.: Neue Entwicklungen für Lager von Bauwerken, Gummi- und Gummitopflager. Bautechnik 39 (1962), S.37-50.
- [3] Bach, C.: Versuche über die Formänderung der Rollen (Cylinder, Walzen) und Platten von Rollenlagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 38 (1894), S.199.
- [4] Bach, C.: Versuche mit Granitquadern zu Brückengelenken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 47 (1903), S.1439-1448.
- [5] Bach, C.: Versuche mit Sandsteinquadern zu Brückengelenken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 48 (1904), S.1915-1916.
- [6] Backhaus, L.: Allgemeine Betrachtungen über die Gelenkconstructionen eiserner Bogenbrücken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 30 (1886), S.741-745, 762-765.
- [7] Baentsch, J.: Ueber die Festigkeit von Rollenlagern. Deutsche Bauzeitung 10 (1876), S.329-330.
- [8] Bäuerle, A.: Zur Bestimmung der Größe der Rollen oder Pendel in den Rollenauflagern der Brücken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 19 (1875), S.161-162.
- [9] Berndt, G.: Über die Gültigkeit der Hertzschen Formeln zur Berechnung der Abplattung von Meßkörpern. Zeitschrift für technische Physik 3 (1922), S.14-21, 82-87.
- [10] Beyer, E.; Wintergerst, L.: Neue Brückenlager, neue Pfeilerform. Bauingenieur 35 (1960), S.227.
- [11] Black, W.: Notes on bridge bearings. RRL report 382 (1971), S.1-10.
- [12] Blumhardt: Über Gelenkquader aus Beton. Zentralblatt der Bauverwaltung 28 (1908), S.395-396.
- [13] Bochmann, H.: Die Abplattung von Stahlkugeln und Zylindern durch den Meßdruck. Diss. an der TH Dresden, 1927.
- [14] Burkhardt, E.: Gepanzerte Betonpendel. Bautechnik 12 (1934), S.664-667.
- [15] Burkhardt, E.: Gepanzerte Betonwälgelenke, -pendel und -rollenlager. Bautechnik 17 (1939), S.230-35.
- [16] Cauer, W.: Bewegliche Brückenlager mit einer Rolle oder einem Pendel. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 44 (1900), S.917-919.
- [17] Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.
- [18] Davey, A.B.; Payne, A.R.: Rubber in bearings for bridges. Rubber Journal (1965), S.24-28.
- [19] Deslandres, M.H.: Expériences sur la Résistance des Rouleaux Métalliques. Annales des Ponts et Chaussées. 7.Serie (1893), S.1160-1174.
- [20] Deslandres, H.: Versuche über die zulässige Belastung der Walzen für Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins 40 (1894), S.238.
- [21] Dickerhof, K.-J.: Bemessung von Brückenauflagern unter Gebrauchslast. Diss. TH Karlsruhe, 1985.
- [22] Dix, J.: Betongelenke unter oftmals wiederholter Druck- und Biegebeanspruchung. In: DAFStb (Hrsg.): Heft 150. Berlin: Ernst & Sohn, 1962.
- [23] Duffing, G.: Reibungsversuche am Gleitlager. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 72 (1928), S.495-499.
- [24] Dumas, A.; Ros, M.: Sur la charge limite admissible de rouleaux en contact avec des chemins. Bulletin technique de la Suisse romande 50 (1924), S.148-152.
- [25] Dumas, A.: Les Résistance au Roulement de Sphères et de Cylindres sur des Plans. In: Tagungsband zum Internationalen Kongress für Brückenbau und Hochbau, Zürich, 1926, S.1-9.
- [26] Eggert, H.: Die baurechtliche Situation bei Lagern für Brücken- und Hochbauten. Stahlbau 39 (1970), S.189-190.
- [27] Eggert, H.: Brückenlager. Bautechnik 50 (1973), S.143-144.
- [28] Eggert, H.; Grote, J.; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen. Bd.1. Berlin: Ernst & Sohn, 1974.
- [29] Eggert, H.; Hakenjos, V.: Die Wirkungsweise von Kalottenlagern. Bauingenieur 49 (1974), S.93-94.
- [30] Eggert, H.: Lager für Brücken und Hochbauten. Bauingenieur 53 (1978), S.161-168.
- [31] Eggert, H.: Vorlesungen über Lager im Bauwesen. 2.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1981.
- [32] Eggert, H.; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen. 2.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1996.
- [33] Eggert, H.: Topflager. Bautechnik 79 (2001), S.750-760.
- [34] Eggert, H.: Kalottengleitlager. Bautechnik 79 (2002), S.84-90.
- [35] Eggert, H.; Kauschke, W.: Structural Bearings. Berlin: Ernst & Sohn, 2002.

- [36] Eggert, H.: Brückenlagertechnik in Deutschland – Die Geschichte einer technischen Revolution. Weimar: Bauhaus-Universität, Professur Verkehrsbau, 2005.
- [37] Eggert, H.: Bewehrte Elastomerlager. Bautechnik 83 (2006), S.6-15.
- [38] Engelsmann; Schlaich; Schäfer: Entwerfen und Bemessung von Betonbrücken ohne Fugen und Lager. In: DAfStb (Hrsg.): Heft 496. Berlin: Beuth, 1999, S.1-124.
- [39] Fleischhauer, K.H.: Die Tragfähigkeit von Zylinderrollen und Kugeln. VDI-Zeitschrift 107 (1965), S.821-822.
- [40] Franz, G.: Gummilager für Brücken. VDI- Zeitschrift 1001 (1959), S.471-478.
- [41] G.M.: Betongelenke in Steinbrücken. Schweizerische Bauzeitung 34 (1899), S.10.
- [42] Großmann, F.; Fehse, W.; Goebel, W.: Lagerschäden an Straßenbrücken. Kurzfassung zu BMV (Hrsg.): Lagerschäden an Straßenbrücken, 1985.
- [43] Grote, J.: Neoprenelager – einige grundsätzliche Erwägungen. Kunststoffe im Bau (1968), S.104-106.
- [44] Grote, J.: Vermeidung von Rissen und Dehnungsschäden durch gummielastische Lagerungen. Kunststoffe im Bau (1968), H.11, S.42-44.
- [45] Grote, J.: Unbewehrte Elastomere-Lager. Bauingenieur 44 (1969), S.121-126.
- [46] Haberkalt, K.: Das Wälzlager – eine neue bewegliche Lagerung von Tragwerken. Österreichische Wochenschrift für den öffentl. Baudienst 8 (1902), S.385-391; mit Erwiderung zu [71] S.745-746.
- [47] Hakenjos, V.: Untersuchungen über die Rollreibung bei Stahl im elastisch-plastischen Zustand. Diss. TH Stuttgart, 1967.
- [48] Hänsch, H.: Entwicklung und Anwendung von Gummischichtenlagern in der DDR. Bauplanung – Bautechnik 21 (1967), S.80-86, 136-138.
- [49] Herzka, L.: Ein kippsticheres Stelzenlager. Eisenbau 1 (1910), S.280-281; mit Zuschrift [124].
- [50] Johnson, J.B.: Strenght of solid metallic rollers to resist crushing. Journal of the Association of Engineering Societies 9 (1884/85), S.110-114.
- [51] Johnson, J.B.: Relation between total load and maximum stress, when one cylinder rests on another at right angles to it. Transactions of the Society of Civil Engineers 21 (1889), S.203-208. Mit Diskussionsbeitrag von Whitemore auf S.209.
- [52] Kammüller; Jeske: Federgelenke. In: DAfStb (Hrsg.): Heft 125. Berlin: Ernst & Sohn, 1957.
- [53] Kauschke, W.: Entwicklungsstand der Gleitlagertechnik für Brückenbauwerke in der Bundesrepublik Deutschland. Bauingenieur 64 (1989), S.109-120.
- [54] Keck: Theoretische Untersuchungen – Ueber die Zusammendrückung zweier sich berührender elastischer Körper. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 21 (1875), S.291-294.
- [55] Keck: Theoretische Untersuchungen – Ueber die gegenseitige Zusammendrückung elastischer Körper mit gekrümmten Oberflächen. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 30 (1884), S.201-203.
- [56] Keck: Theoretische Untersuchungen – Versuche über die Formänderung der Rollen (Cylinder, Walzen) und Platten von Rollenlagern. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 40 (1894), S.567.
- [57] Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.
- [58] Köpke: Ueber die Kompression von Körpern mit gekrümmten Oberflächen. Deutsche Bauzeitung 3 (1869), S.61-62.
- [59] Köpke, C.: Ueber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 34 (1888), S.374-380.
- [60] Kübler, J.: Bestimmung der Größe der Rollen oder Pendel in den Rollenauflegern der Brücken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 18 (1874), S.235-237; mit Berichtigung [8].
- [61] Kübler: Das einfache Pendel als Ersatz für das Rollenkipplager. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 44 (1900), S.216f, 328; mit Zuschrift [16].
- [62] Labes, J.: Ueber Berührungskipplager mit doppelter Krümmung. Centralblatt der Bauverwaltung 9 (1889), S.339-342.
- [63] Lasche, O.: Die Reibungsverhältnisse in Lagern mit hoher Umfangsgeschwindigkeit. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 46 (1902), S.1881-1890, 1932-1938, 1962-1971.
- [64] Leonhardt, Fr.; Wintergerst, L.: Über die Brauchbarkeit von Bleigelenken. Versuchsergebnisse und Erfahrungen – Vorschlag einer neuen Bestimmung. Beton- und Stahlbetonbau 56 (1961), S.123-131.
- [65] Liermann, K.: Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern. Diss. TU Braunschweig, 1972.

- [66] Lorenz, W.: Lagersanierung des Hochbahn-Viaduktes der U-Bahn-Linie 2 in Berlin-Prenzlauer Berg. In: BAM (Hrsg.): Tagungsbericht zu Sonderkapiteln aus dem Brücken- und Ingenieurbau. Berlin, 2003, S.59-65.
- [67] Loser, H.A.: Observations on Bridge Expansion. Engineering News – a journal of civil engineering and construction 70 (1913), S.1170-1171.
- [68] Macdonald, Ch.: Discussion to a paper by C.Shaler Smith "Draw-Spans and their Turn-Tables. Transaction of the American Society of Civil Engineers 3 (1875), S.139-141.
- [69] Maissen, A.: Versuche mit Brückenlagern. Schweizerische Bauzeitung 96 (1978), S.3-12.
- [70] Maissen, A.: Reibungswiderstand von älteren PTFE-Gleitlagern – Einfluß von Alterung und Verschmutzung auf Brückenlager. Bauingenieur 68 (1993), S.333-337.
- [71] Mandl, J.: Zum Artikel „Das Wälzlager“ von Karl Haberkalt. Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 8 (1902), S.744-745.
- [72] Matschoß, C.: Ein Kugellager aus dem Jahre 1818. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie 1 (1909), S.275.
- [73] Menn, Chr.: Auflager-Bewegungen bei Brücken. Schweizerische Bauzeitung 87 (1969), S.899-900.
- [74] MEXE Test Report No. 944: Tests on cylindrical roller bearings – BS 153. Military Engineering Experimental Establishment Christchurch, Nov. 1965; In: [682].
- [75] Périssé, M.: Frottement des poutres libres sur glissières et sur rouleaux en fonte. In: Résumé des Procès-Verbaux des Séances du mois d'Octobre 1883. Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France (1883), S.349-380.
- [76] Pietsch, H.: Beitrag zur Anwendung von Gummischichtenlagern für Eisenbahnbrücken. Deutsche Eisenbahntechnik 13 (1965), S.453-457.
- [77] Ramberger, G.: Structural Bearings and Expansion Joints for Bridges. Höggerberg: IABSE-AIPC-IVBH, 2002.
- [78] Rasch, E.: Prüfung von Gussstahlkugeln. Zeitschrift für Werkzeugmaschinen und Werkzeuge (1899), S.301-303, 319-320.
- [79] Rasch, E.: Über die Berechnung der an Kugel- und Rollenlagern auftretenden Materialspannungen. Eisenbau 6 (1915), S.1-8.
- [80] Rasch, E.: Zur Theorie und Praxis der rollenden Reibung und der in Wälzlagern auftretenden Materialbeanspruchungen. Eisenbau 7 (1916), S.13-17.
- [81] Resinger, Fr.: Längszwängungen – eine Ursache von Brückenlagerschäden. Bauingenieur 46 (1971), S.334-338.
- [82] Schindler, H.J.; Morf, U.: Schadens- und Sicherheitsanalysen an betriebsgeschädigten Stahlrollen von Brückenlagern. In: Bundesamt für Strassenbau (Hrsg.): Forschungsauftrag 87/90 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung, 1995.
- [83] Schönhöfer, R.: Das Vielkugel-Auflager. Zentralblatt der Bauverwaltung 60 (1940), S.629-635.
- [84] Schönhöfer, R.: Neuartige Ausführungen von Brückenauflagern. VDI-Zeitschrift 85 (1941), S.215-216.
- [85] Schönhöfer, R.: Das Auflager. Technik 2 (1947), S.126.
- [86] Schönhöfer, R.: Neugestaltungen auf dem Gebiet des Auflagerbaues und auf verwandten Gebieten. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1952.
- [87] Schuster: Berechnung der in Gelenken steinerner Brücken auftretenden größten Pressung. Centralblatt der Bauverwaltung 20 (1900), S.232.
- [88] Schwinning: Versuche über die zulässige Belastung von Kugeln und Kugellagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 45 (1901), S.332-336.
- [89] Seytter, K.: Ueber die Wirkungsweise von Bleigelenken. Beton und Eisen 25 (1926), S.29-31.
- [90] Stamer: Versuche mit Rollenlagern. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Berlin: Selbstverlag, 1915, S.1-71.
- [91] Stévert, A.: Note sur les Dépressions que subissent deux Corps en Contact. Revue universelle des mines 36 (1874), S.148-160.
- [92] Stribeck: Kugellager für beliebige Belastungen. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Heft 2. Berlin: Springer, 1901; auch In: Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 45 (1901), S.73-79, 118-122.
- [93] Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 46 (1902), S.1341-1348, 1432-1438, 1463-1470.
- [94] Thul, H.: Brückenlager. Stahlbau 38 (1969), S.353-360.
- [95] Topaloff: Gummilager für Brücken. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959), S.229-230.

- [96] Topaloff, B.: Gummilager für Brücken – Berechnung und Anwendung. Bauingenieur 39 (1964), S.50-64, Zuschrift dazu von Massonnet in Bauingenieur 39 (1964), S.428.
- [97] Torr, R.P.: Bridge Bearings. Close Liaison between Designer and Manufacturer essential. Highways & Public works 34 (1966), Sept. S.10-12.
- [98] Uetz, H.; Hakenjos, V.: Rollreibungsversuche mit Brückenlagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 106 (1964), S.537-543.
- [99] Uetz, H.; Hakenjos, V.: Gleitreibungsversuche mit Polytetrafluorethylen bei hin- und hergehender Bewegung. Bautechnik 44 (1967), S.159-166.
- [100] Vallette: Étude sur les vieux Tabliers en Fer. Annales des Ponts et Chaussées 106 (1936), S.387-412.
- [101] Veit, O.: Bleigelente für massive Bogenbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 47 (1952), S.183-185.
- [102] Vereinigte Kugellagerfabriken Aktiengesellschaft Schweinfurt (Hrsg.): Statische Tragfähigkeit von Wälzlagern und ihre Abhängigkeit von der Härte. In: Wälzlagertechnische Mitteilung Nr.3 (1950), S.1-16.
- [103] Weihprecht, M.: Hochbeanspruchte stählerne Brückenlager. Tiefbau 8 (1966), S.88-93.
- [104] Wetzck, V.: Entwicklung der Brückenlager – Geschichtlicher Überblick. Bautechnik 83 (2006), S.721-732.
- [105] Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.
- [106] Whittemore, H.L.; Petrenko, S.N.: Friction and carrying capacity of ball and roller bearings. In: Department of Commerce (Hrsg.): Technologic Papers of the Bureau of Standards, No. 201, Washington, 1921, S.1-34.
- [107] Willmann, L.v.: Beitrag zur Berechnung der Rollvorrichtung für Brückenverschiebungen. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 30 (1886), S.914-915.
- [108] Winkler, E.: Die Gitterträger und Lager gerader Träger. 2.Aufl. Wien: Carl Gerold's Sohn, 1875. (Winkler, E.: Vorträge über Brückenbau, gehalten an der k. k. technischen Hochschule in Wien. Eiserne Brücken, 2.Heft: Gitterträger und Lager gerader Träger. 2.Aufl.).
- [109] Zechlin, M.R.: Kugel- und Rollenlager. Theorie, Berechnung und praktische Beispiele. Berlin: Polytechnische Buchhandlung A.Seydel, 1900.
- [110] N.N.: Périssé's Versuche über rollende und gleitende Reibung an den Stützpunkten von Eisenträgern. Dingler's Polytechnisches Journal 251 (1884), S.55-57.
- [111] N.N.: Ueber die Ausbildung der Lager eiserner Brücken. Centralblatt der Bauverwaltung 14 (1894), S.495-506.
- [112] N.N.: Aus den Verhandlungen des Ausschusses für technisch-wissenschaftliche Versuche. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 44 (1900), S.1227-1228.
- [113] N.N.: Wissenswertes über das Eßlinger Corroweldlager. Maschine und Werkzeug / Europe Technik (1961), S.18-20.
- [114] N.N.: Steel roller bearings for large bridges. Concrete and constructional engineering: including prestressed concrete 58 (1963), S.490-492.
- [115] N.N.: Englisches Brückenlager. Schweizerische Bauzeitung 86 (1968), S.177.

Brückenbau, Hochbau, Baukonstruktionen

- [116] A.B.: Die neue Stauffacher-Brücke in Zürich. Schweizerische Bauzeitung 33 (1899), S.82-83.
- [117] Baldermann, O.: Die Eisenbahnbrücke über die Donau bei Maria-Ort. Allgemeine Bauzeitung 38 (1873), S.193-205.
- [118] Baumeister: Verbesserung der eisernen Bogenbücken. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins für das Königreich Hannover 9 (1863), S.231-234.
- [119] Becker, M.: Die eiserne Brücke über die Kinzig bei Offenburg. Allgemeine Bauzeitung 18 (1853), S.179-188, Abb. 567-71.
- [120] Becker, M.: Der Brückenbau in seinem ganzen Umfange. Stuttgart: Macken, 1858.
- [121] Beermann, Fr.: Die neuen Rheinbrücken bei Köln. Zentralblatt der Bauverwaltung 28 (1908), S.386-388, 398-401, 406-408.
- [122] Bendel, A.: Victoria-Brücke bei Montreal, nach Notizen von Henz. Zeitschrift für Bauwesen 10 (1860), S.539-552, Bl.58-60.
- [123] Bernhard, K.: Die Stubenrauch-Brücke über die Oberspree bei Berlin. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 52 (1908), S.1942-1951, 1987-1994.
- [124] Bernhard, K.: Zuschrift an die Schriftleitung. Eisenbau 1 (1910), S.486.

- [125] Bernhard, K.: Stößensee- und Havelbrücke im Zuge der Döberitzer Heerstraße. Zeitschrift für Bauwesen 61 (1911), S.322-358, Bl.28-33.
- [126] Bernhard, K.: Eiserne Brücken. Berlin: Verlag Deutsche Bauzeitung, 1911.
- [127] Bersinger: Die neue Strassenbrücke über die Thur bei Billwil-Oberbüren, Kanton St. Gallen. Schweizerische Bauzeitung 44 (1904), S.157-159.
- [128] Bleich, Fr.: Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin: Springer, 1924.
- [129] Bosse, R.: Eisenbahnbrücke über den Missouri in Randoloh Bluffs bei Kansas City. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 33 (1889), S.361-364, 393-396, Tafeln 13-17.
- [130] Boyeng, U.: Die Herrschaftsbrücke bei Bad Teinach. Das erste weit gespannte Brückengewölbe im Königreich Württemberg. Denkmalpflege in Baden-Württemberg 35 (2006), S.65-67.
- [131] Brandt, E.: Lehrbuch der Eisen-Constructionen. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1876.
- [132] Breymann, G.A.: Allgemeine Bau=Constructions=Lehre mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen. III.Theil: Constructionen in Metall. Stuttgart: Hoffmann'sche Verlagsbuchhandlung, 1854.
- [133] Clark, E.: The Britannia and Conway Tubular Bridges. Vol. I, II. London: Day & Son, 1850.
- [134] Cooper, Th.: American Railroad Bridges. Transactions of the American Society of Civil Engineers 21 (1889), S.1-51, 566-607.
- [135] Culmann, R.: Der Bau der eisernen Brücken in England und Amerika. Allgemeine Bauzeitung 17 (1852), S.163-222.
- [136] Dietz, W.: Der Bauunfall der äußeren Maximiliansbrücke in München. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 48 (1904), S.1407-1411.
- [137] Dircksen, F.: Der Brückenbau in den Vereinigten Staaten von Nordamerika. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 52 (1908), S.321-330, 367-376, 451-460, 496-504, 529-539, 579-585.
- [138] Dischinger, Fr.: Beschreibung der Brücke nebst theoretischen Untersuchungen über weitgespannte Massivbogenbrücken. In: Arbeitsgemeinschaft der am Bau beteiligten (Hrsg.): Adolf Hitler-Brücke, Koblenz. Berlin: Ernst & Sohn 1934, S.5-50. (Ein Autor bzw. Herausgeber ist nicht benannt. Das Buch wurde offenbar von einer Arbeitsgemeinschaft der am Bau Beteiligten herausgegeben.)
- [139] Douglas, H.: A Reply to some Observations in a review of the Pamphlet entitled Metropolitan Bridges and Westminster Improvements in [272]. Civil Engineer and Architect's Journal 9 (1846), S.358-359.
- [140] Douglas, H.: Stability and Strength of Hungerford Bridge. Civil Engineer and Architects Journal 10 (1847), S. 73-75. Reply to the Objections raised in [273].
- [141] Dufour: Expériences sur la Ténacité du Fil de Fer éprouvé dans des Températures très-Différentes. Sciences et Arts 22 (1823), S.220-222.
- [142] Dürr: Das Shell-Haus in Berlin. Bauwelt 23 (1932), S.717-724.
- [143] Dutens, J.: Mémoires sur les Travaux Publics de l'Angleterre. Paris: Imprimerie Royale, 1819.
- [144] E.: Le pont sur l'inn, à Zuoz. Bulletin technique de la Suisse romande 29 (1903), S.33-35.
- [145] Fairbairn, W.: Die Eisernen Träger und ihre Anwendung beim Hochbau und Brückenbau. Braunschweig: Schulbuchhandlung, 1859.
- [146] Feldmann, M.; Pak, D.: Zu Verbundbrücken mit integralen Widerlagern. Stahlbau 78 (2009), S.907-915.
- [147] Fiedler, E.: Der Stabbogen bei stählernen Straßenbrücken – Entwicklungstendenzen der letzten 50 Jahre – Teil 1. Stahlbau 74 (2005), S.96-107.
- [148] F.M.: Iron Bridge on a new Construction. European magazine and London review 78 (1820), Sept. S.236-237.
- [149] Fraenkel, W.: Construction eiserner Fachwerkträgerbrücken. Civilingenieur 15 (1869), S.177-198, Taf.14.
- [150] Gabriely, A.v.: Constructions-Details für schmiedeeiserne Brücken. Graz: Leuschner & Lubensky, 1879.
- [151] Gamber, E.: Ueber Dilatation eiserner Eisenbahn-Brücken. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 37 (1882), S.254-250, Taf.35 und Zuschrift in 38 (1883), S.93.
- [152] Gehler: Querbahnsteighalle in Eisenbeton für den Hauptbahnhof in Leipzig. Deutsche Bauzeitung 46 (1912), S.65-71, 73-78, 84-88.
- [153] Gehler, W.: Die technischen Lehren beim Bau der Moselbrücke in Koblenz. In: [138].
- [154] Geißler, K.: Die Elbbrücke Blaues Wunder in Dresden – Tragwerk und Maßnahmen zur weiteren sicheren Nutzung. Stahlbau 73 (2004), S.139-150.
- [155] Gerber, H.: Das Pauli'sche Trägersystem und seine Anwendung. Nürnberg: Campe & Sohn, 1859.
- [156] Gleim, C.O.: Der amerikanische Brückenbau der Neuzeit. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 22 (1876), S.73-114, 255-282, 395-416.
- [157] Goering, A.: Die Bauausführung der zweiten Weichselbrücke bei Dirschau. Centralblatt der Bauverwaltung 10 (1890), S.323-352.

- [158] Grau, R.; Richter, H.-G.: Neue Eisenbahnelbbrücke Riesa, Teil 1: Vorgeschichte. Bauplanung-Bautechnik 20 (1966), S.552-553.
- [159] Grüning, M.: Der Eisenbau. Berlin: Springer, 1929.
- [160] Häsel, E.: Die Elbbrücke bei Dömitz. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur- Vereins für das Königreich Hannover 2 (1876), S.239-254, Bl.654-657.
- [161] Häsel, E.: Der Brückenbau – Ein Handbuch zum Gebrauche beim Entwerfen von Brücken in Eisen, Holz und Stein. 1.Teil: Die eisernen Brücken. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1908.
- [162] Heinzerling, F.: Die angreifenden und widerstehenden Kräfte der Brücken- und Hochbau-Constructions. Berlin: Ernst & Korn, 1867.
- [163] Heinzerling, F.: Historische Uebersicht über die Anwendung des Eisens zu Brückenbauten. Allgemeine Bauzeitung 33/34 (1868/69), S.67-95.
- [164] Helas, V.; Zadnicek, Fr.; Griebel, M.: Das Blaue Wunder. Halle: Fliegenkopf, 1995.
- [165] Hersel, O.: Die Jahrhunderthalle zu Breslau – Zum 75jährigen Jubiläum der Halle, einem Monument des Stahlbetonbaus. Beton- und Stahlbetonbau 82 (1987), S.313-317.
- [166] Heyn, R.: Der Gelenkträger im Hochbau. Deutsche Bauzeitung 16 (1882), S.203-204.
- [167] Historic American Engineering Record (Hrsg.): Reading-Halls Station Bridge. HAER No. PA-55. S.17-40.
- [168] Hornbostel, K.: Beschreibung der eisernen Brücken auf der k.k. priv. Kaiserin-Elisabethbahn auf der Strecke von Wien bis Salzburg. Allgemeine Bauzeitung 26 (1861), S.166-172.
- [169] Humber, W.: A practical Treatise of cast and wrought Iron Bridges and Girdgers. London: George Watson, 1857.
- [170] James, J.G.: Ralph Dodd, The very Ingenious Schemer. Transactions 47 (1974), S.161-178.
- [171] James, J.G.: Thomas Wilson's Cast-Iron Bridges 1800-1810. Transactions 50 (1978), S.55-72.
- [172] James, J.G.: The Evolution of Iron Bridge Trusses to 1850. Transactions 52 (1980), S.67-101.
- [173] James, J.G.: Russian Iron Bridges to 1850. Transactions 54 (1982), S.79-104.
- [174] James, J.G.: Some Steps in the Evolution of Early Iron Arched Bridge Designs. Transactions 59 (1988), S.153-187.
- [175] Karst, Fr.: Brücke über den Lek bei Kuilenburg in Holland. Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- u. Architektenvereins 24 (1872), S.105-108.
- [176] Keck: Ueber das zu Brücken-Constructions zu verwendende Schmiedeeisen, Blech und Faconeisen. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 13 (1867), S.371-397.
- [177] Kessler: Vom Holzsteg zum Weltmonument: Die Geschichte der Salginatobelbrücke. Schiers, Verl. AG Buchdruck, 1996.
- [178] Ki.: Die Lager für die Sydney-Hafenbrücke. Bautechnik 5 (1927), S.471-472.
- [179] Königer, O.: Die Konstruktionen in Eisen. 5.Aufl. Leipzig: Gebhardt's Verlag, 1890. (Breymann, G.A.: Allgemeine Bau-Konstruktions-Lehre mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen. 3.Teil: Konstruktionen in Eisen. 5.Aufl.).
- [180] Königer: Die eiserne Kuppel über der Haupthalle des neuen Empfangsgebäudes in Halle a.S. Zeitschrift für Bauwesen 42 (1892), S.217-232.
- [181] Königliche Kommission für den Bau der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn (Hrsg.): Die Bau-Anlagen der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn. Manuskript, um 1860. In: [690/E15440].
- [182] Köpke: Ueber die Construction einer steifen Hängebrücke. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins für das Königreich Hannover 6 (1860), S.346-354 und 7 (1861), S.231-261.
- [183] Köpke: Ueber den Bau eiserner Brücken. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins für Hannover 11 (1865), S.71-79.
- [184] Köpke, C.: Ueber Hängebrücken mit drei Gelenken. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins für Hannover 34 (1888), S.29-34.
- [185] Krüger, R.: Leitfaden des Brückenbaues. Leipzig: Weber-Verlagsbuchhandlung, 1905.
- [186] Landsberg, Th. (Hrsg.): Handbuch der Ingenieurwissenschaften. 2.Teil: Der Brückenbau. 3.Bd.: Die eisernen Brücken im allgemeinen. Theorie der eisernen Balkenbrücken. Leipzig: Engelmann, 1909.
- [187] Laissle, Fr.; Schübler, A.: Der Bau der Brückenträger mit wissenschaftlicher Begründung der gegebenen Regeln und mit besonderer Rücksicht auf die neuesten Ausführungen. Stuttgart: Paul Neff, 1864.
- [188] Leibbrand, K.v.: Betonbrücke über die Donau bei Munderkingen. Zeitschrift für Bauwesen 44 (1894), S. 541-558, Bl. 64 u.65.
- [189] Leibbrand, K.v.: Gewölbte Brücken. Leipzig: Engelmann 1897.
- [190] Leibbrand, M.: Betonbrücken mit Granitgelenken über die Eyach bei Imnau in Hohenzollern. Zeitschrift für Bauwesen 46 (1896), S.187-206.

- [191] Leibbrand, M.: Donaubrücke bei Inzigkofen in Hohenzollern. Zeitschrift für Bauwesen 46 (1896), S. 279-292, Bl. 37 u.38.
- [192] Lentze: Bemerkungen über die größeren Brücken-Bauwerke in Frankreich, England und Irland, auf einer Reise im Winter 1844/45 gesammelt. Verein zur Beförderung des Gewerbefleißes in Preußen 25 (1846), S.88-114.
- [193] Lentze: Die im Bau begriffenen Brücken über die Weichsel bei Dirschau und über die Nogat bei Marienburg. Zeitschrift für Bauwesen 5 (1855), S.445-458.
- [194] Leupold, J.: Theatrum pontificiale oder Schauplatz der Brücken und Brücken=Baues. Leipzig: Christoph Zunkel, 1726.
- [195] Lewis, M.J.T.: Dunham bridge. A Memorial History. Occasional Papers in Lincolnshire History and Archaeology 5 (1978), S.1-59.
- [196] Lorenz, W.: Die Entwicklung des Dreigelenksystems im 19. Jahrhundert. Stahlbau 59 (1990), S.1-10.
- [197] Lorenz, W.; Rhode, A.: Building with Iron in Nineteenth Century Bavaria: The Valhalla Roof Truss and its Architect Leo von Klenze. Construction History 17 (2001), S.55-74.
- [198] Malberg: Historisch-kritische Bemerkungen über Kettenbrücken. Zeitschrift für Bauwesen 7 (1857), S.225-238, 559-573; (1859), S.397-412, 547-570.
- [199] Malberg: Der Crumlin-Viaduct in der Newport-Abergavenny- und Hereford-Eisenbahn-Verlängerung. Zeitschrift für Bauwesen 8 (1858), S.17-32, Bl.11-14.
- [200] Mehrtens: Notizen über die Herstellung eiserner Brücken. Deutsche Bauzeitung 16 (1882), S.125-128, 185-187, 210-213, 234-237, 292-294, 315-319, 341-343, 363-366, 369-370.
- [201] Mehrtens, G.: Eisen und Eisenkonstruktionen in geschichtlicher, hüttentechnischer und technologischer Beziehung. Berlin: Kommissions-Verlag von Ernst Toeche, 1887.
- [202] Mehrtens, G.: Weitgespannte Strom- und Thalbrücken der Neuzeit. Centralblatt der Bauverwaltung 10 (1890), S.357-392.
- [203] Mehrtens: Ueber die Verwendung des Flußeisens für Bauconstruktionen. Stahl und Eisen 13 (1893), S.581-589, 631-639.
- [204] Mehrtens, G.: Der deutsche Brückenbau im XIX. Jahrhundert. Berlin: Springer, 1900.
- [205] Mehrtens, G.-Chr.: Vorlesungen über Ingenieurwissenschaften. 2.Teil. Eisenbrückenbau. 1.Bd. Leipzig: Engelmann, 1908.
- [206] Melan, J.: Der Brückenbau. 3.Bd: Eiserne Brücken. 1.T. Leipzig: Deuticke, 1927.
- [207] Mensch, G.: Die Aussteifung von Stahlskeletthochhäusern. Stahlbau 4 (1931), S.37-48.
- [208] Mensch, G.: Der Brand im Reichstagsgebäude. Ein Beitrag zum Verhalten der Stahlkonstruktion im Feuer. Stahlbau 8 (1935), S.105-110.
- [209] Mittheilung nach amtlichen Quellen: Die Rhein-Brücke bei Cöln. Zeitschrift für Bauwesen 13 (1863), S.175-196, 335-370.
- [210] Molinos, L.; Pronnier, C.: Traité théorique et pratique de la Construction des Ponts Métalliques. Paris : A. Morel et Ce, 1857.
- [211] Mörsch, E.: Die Isarbrücke bei Grünwald. Schweizerische Bauzeitung 44 (1904), S.263-267, S.279-283.
- [212] Mörsch, E.: Die Gmündertobel-Brücke bei Teufen im Kanton Appenzell. Schweizerische Bauzeitung 53 (1909), S. 81-85, 95-101, 114-115, 122-128.
- [213] Mörsch, E.: Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton. Entwurf und Konstruktion. Stuttgart: Konrad Wittwer, 1958.
- [214] Moxon, J.D.: Verbesserung im Baue der Brücken und ähnlicher Gebäude. Dingler's Polytechnisches Journal 15 (1824), S.347-349.
- [215] Müller, H.: Die Brückenbaukunde in ihrem ganzen Umfange. Ein Handbuch für Ingenieure und Baumeister. 4.Bd. Leipzig: Romberg' s Verlag, 1860.
- [216] Müller, G.: Die Sciotoville-Brücke. Bautechnik 5 (1927), S.219-221.
- [217] Neuhaus: Brief der Direktion der Berlin-Hamburger-Eisenbahn-Gesellschaft an das Königliche Eisenbahn Kommissariat vom 15.03.1872. In: [679/374-14, Nr.2004].
- [218] Niemczyk, E.: Die Jahrhunderthalle in Breslau – ein Triumph des Eisenbetonbaus. In: Schunck, E. (Hrsg.): Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens 1997, H.8. TU München, S.51-65.
- [219] Niernsee, J.: Gusseiserne Dachstühle in Amerika. Allgemeine Bauzeitung 7 (1842), S.346-353.
- [220] Osborne, R.B.: Brief vom 13. Dezember 1847. Report of the Commissioners appointed to inquire into the application of iron in railway structures, 1849, p. 413 and App. 8. In: [683].
- [221] Pollack, J.: Metallbrücke zur Übersetzung des Royalkanals bei Dublin. Allgemeine Bauzeitung 13 (1848), S.1-27, Bl.148,149.

- [222] Proell, R.; Scharowsky, C.: Der amerikanische und der deutsche Brückenbau in Eisen. *Civilingenieur* 24 (1878), S.497-518, Tafel XXIII.
- [223] Quénot, J.-P.: *Mémoire sur le pont suspendu en fil de fer, construit sur la Charente, a Jarnac*. Paris : Chez Bachelier, Libraire, 1828.
- [224] Ramm, W.: *Die Alte Weichselbrücke in Dirschau*. TU Kaiserslautern – Fachgebiet Massivbau, 2004.
- [225] Rendel, J.M.: Particulars of the construction of the Lary bridge. *Transaction of the Institution of Civil Engineers* 1 (1836), S.99-108, pl.14-15.
- [226] Renni, J.: MS report books. vol. 11, S.226-229. In: [683].
- [227] Rennie, G.: On the Expansion of Arches. *Civil Engineer and Architect's Journal* 3 (1840), S.133-34.
- [228] Rieppel, A.; Frentzen, G.: *Konstruktion und Architektur neuerer deutscher Brückenbauten*. *Architektur und Ingenieurwesen* 44 (1898), S.562-586.
- [229] Ritgen, H.: *Beiträge zur Würdigung des Antheils der Lehre von den Constructionen in Holz und Eisen*. Leipzig, Darmstadt: Carl Wilhelm Leske, 1835.
- [230] Ritter, W.: *Der Brückenbau in den Vereinigten Staaten Amerikas*. Bern: Fritz Haller & Co., 1894.
- [231] Röder, G.L.A.: *Praktische Darstellung der Brückenbaukunde nach ihrem ganzen Umfange*. 2.Theil. Darmstadt: Heyer's Verlagsbuchhandlung, 1846.
- [232] Romeijn, A.: Auswirkungen von Temperatur, Schwinden und Kriechen auf Integralbrücken. *Stahlbau* 75 (2006), S.231-237.
- [233] Rondelet: *Theoretisch – praktische Anleitung zur Kunst zu bauen*. 1.Bd. Nach der 6.Aufl. aus dem Französischen übersetzt von C.H. Distelbarth. Leipzig, Darmstadt: Karl Wilhelm Leske, 1833.
- [234] Roš: Zur Zerstörung der Rheinbrücke bei Tavanasa. *Schweizerische Bauzeitung* 90 (1927), S.232-236.
- [235] Sassu, M.: Restoration of the historical steel vault of the Goldoni Theatre in Livorno. *Proceedings of the Fourth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, Padova, November 2004, S.1029-1037.
- [236] Schäffer, Th.; Sonne, Ed. (Hrsg.): *Handbuch der Ingenieurwissenschaften*. 2.Bd.: *Der Brückenbau*. 2.Abth.: *Eiserne Brücken, Bewegliche und Aquaduct-Brücken*. Leipzig: Engelmann, 1882.
- [237] Schaper, G.: *Eiserne Brücken*. 1.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1908.
- [238] Schaper, G.: *Eiserne Brücken*. 2.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1911.
- [239] Schaper, G.: *Eiserne Brücken*. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1914.
- [240] Schaper, G.: *Eiserne Brücken*. 5.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1922.
- [241] Schaper: Ergebnis des engeren Ausschreibens zur Erlangung von Entwürfen für den Bau einer festen Straßenbrücke über den Rhein in Köln-Mülheim zum Ersatz der Schiffbrücke. *Bautechnik* 5 (1927), S.57-58, 69-72, 105-108, 134-139, 215-217, 274-277, 298-303.
- [242] Schaper, G.: *Feste stählerne Brücken*. 6.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1934.
- [243] Schaper, G.: *Stählerne Brücken*. Bd.1, Teil 1, 7.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1949.
- [244] Scharnweber, J.: *Die Dömitzer Elbbrücken*. 2.Aufl. Lüchow: Köhring & Co, 1991.
- [245] Schau, A.: *Der Brückenbau*. II.Theil: *Die eiserne Brücke*. 3. Aufl. Leipzig: Teubner, 1932.
- [246] Schneider, E.: Versuche über die Reibung in Gleit- und Rollenlagern. *Petroleum* 3 (1930), S.221-236, 337-348.
- [247] Schubert, J.A.: Die Überbrückung des Göltzsch- und des Elsterthals auf der sächsisch-bayerischen Eisenbahn. *Allgemeine Bauzeitung* 11 (1846), S.382-392.
- [248] Schwedler, W.: Der eiserne Überbau der Brahe-Brücke bei Czersk, in der Bromberg-Thorner Eisenbahn. *Zeitschrift für Bauwesen* 11 (1861), S.579-602.
- [249] Schwedler, W.: Resultate über die Construction der eisernen Brücken. *Zeitschrift für Bauwesen* 15 (1865), S. 331-340.
- [250] Solca, J.: Die Rheinbrücken bei Tavanasa und Waltensburg. *Schweizerische Bauzeitung* 63 (1914), S.343-345.
- [251] Spohn: *Kunstbauten der Moselbahn*. *Zeitschrift für Bauwesen* 34 (1884), S.49-78.
- [252] Stehlin, Fr.: Die Röhrenbrücke bei Conway und über die Menai-Straits auf der Chester-Holyhead-Eisenbahn in England. *Allgemeine Bauzeitung* 14 (1849), S.175-193, Bl.273-280.
- [253] Stein: Die Bau-Anlagen der Kreuz-Cüstrin-Frankfurter Eisenbahn. *Zeitschrift für Bauwesen* 8 (1858), S.459-484.
- [254] Stiglat, Kl.: *Erste Brücken aus Beton*. *Beton- und Stahlbetonbau Spezial* (1999), S.58-65.
- [255] Targé: Der Saale-Uebergang der Magdeburg-Leipziger-Eisenbahn bei Grizehna unfern Calbe an der Saale. *Zeitschrift für Bauwesen* 3 (1853), S. 479-84.

- [256] Trauer; Gehler: Die Festhalle in Breslau. *Armierter Beton* 6 (1913), Jan. S.150-160, Febr. S.49-66, Mai S.179-191, Juni S.231-240. *Armierter Beton* 7 (1914), Jan. S.8-16, Febr. S.51-57, März S.93-101.
- [257] Trautz, M.: *Eiserne Brücken im 19. Jahrhundert in Deutschland*. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1991.
- [258] Treuding: *Brücken von Schmiedeeisen*. *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins für das Königreich Hannover* 6 (1860), S.175-203.
- [259] Vianello, L.: *Der Eisenbau*. München: Oldenburg, 1905.
- [260] Vicat, L.-J.: *Description du pont suspendu construit sur la Dordogne*. Paris: Carilian-Goeury, 1830.
- [261] Vicat: *Recherches Expérimentales sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture ou l'affaissement d'une certaine classe de solides*. *Annales des Ponts et Chaussées*. 1.Serie (1833), S.201-268.
- [262] Viet Tue, N.; Jankowiak, H.: *Betongelenke aus selbstverdichtendem und hochfestem Beton bei der neuen Elbebrücke Mühlberg*. *Bautechnik* 86 (2009), S.637-646.
- [263] Voit: *Ueber Dachstühle von Gusseisen, in Sonderheit über ihre Anwendung auf Schauspielhäuser*. *Dingler's Polytechnisches Journal* 10 (1823), S.257-264.
- [264] Weißhaupt, Th.: *Eisenkonstruktionen bei Eisenbahnbrücken*. *Allgemeine Bauzeitung* 13 (1848), S.134-140, Bl.185-188.
- [265] Werner, E.: *Der Kristallpalast zu London 1851*. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1970.
- [266] Werner, E.: *Die ersten eisernen Brücken (1777-1859)*. Diss. an TU München, 1974.
- [267] Weyrauch: *Ueber die Zunahme der Brückenspanweiten im neunzehnten Jahrhundert*. *Zeitschrift für Bauwesen* 51 (1901), S. 465-480, 617-638.
- [268] Wittek, K.H.: *Die Entwicklung des Stahlhochbaus von den Anfängen (1800) bis zum Dreigelenkbogen (1870)*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1964.
- [269] N.N.: *Ueber die Wiedererbauung der Kuppel der sogenannten Halle-au-bled in Paris*. In: Gilly, David: *Sammlung nützlicher Aufsätze und Nachrichten die Baukunst betreffend*. Berlin, 1805, S.77-90.
- [270] N.N.: *Observations upon Iron Lattice Bridges*. *Journal of the Franklin Institut* 37 (1844), April, S.229-230.
- [271] N.N.: *Hungerford Suspension Bridge*. *Civil Engineer and Architect's Journal* 8 (1845), S.165-166, Plates XIII,XIV,XV.
- [272] N.N.: *Book review to "Metropolitan Bridges and Westminster Improvements" by Sir Howard Douglas*. *Civil Engineer and Architect's Journal* 9 (1846), S.286-287.
- [273] N.N.: *Stability and Strength of Hungerford Bridge*. *Civil Engineer and Architects Journal* 9 (1846), S.363-365; Reply to [139].
- [274] N.N.: *Menai and Conway Bridges*. *Builder* 4 (1846), S.461.
- [275] N.N.: *Beschreibung der Dachkonstruktion von der Personenhalle auf dem Bahnhofe der Sächsisch-Bayerischen Bahn zu Leipzig*. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens* 2 (1847), S.159-161.
- [276] N.N.: *Wrought-Iron Bowstring Girders for Bridges*. *Civil Engineer and Architect's Journal* 11 (1848), S.300-301.
- [277] N.N.: *Railway Bridges*. *Civil Engineer and Architect's Journal* 12 (1849), S.192.
- [278] N.N.: *Wrought Iron Bowstring Girders for Bridges*. *Journal of the Franklin Institute of the State of Pennsylvania* 47 (1849), Jan., S.1-3.
- [279] N.N.: *Construction der Schutzkuppel der St. Nicolai-Kirche in Potsdam*. *Zeitschrift für Bauwesen* 2 (1852), S.155-160.
- [280] N.N.: *Die Gitterbrücken der Weichsel*. *Unsere Zeit* 3 (1859), S.740-750.
- [281] N.N.: *Removal of a Wrought Iron Railway Bridge at Stepney*. *Engineer* 41 (1876), S.390-391.
- [282] N.N.: *Der Bau der neuen Eisenbahnbrücken über die Weichsel bei Dirschau und über die Nogat bei Marienburg*. *Zeitschrift für Bauwesen* 45 (1895), S. 237-265.
- [283] N.N.: *Der Wettbewerb für eine Autobrücke über die Sihl in Zürich*. *Beton & Eisen* (1904), S.264-279.

Statik, Mechanik, Material

- [284] Asthöwer, Fr.: *Ueber Gussstahl – Façonguss*. *Stahl und Eisen* 1 (1881), S.109-114.
- [285] Auerbach, F.: *Absolute Härtemessung*. *Annalen der Physik und Chemie* 43 (1891), S.61-100.
- [286] Bach, C.v.: *Bücherschau: Die angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre, von L.Tetmajer*. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* 33 (1889), S.476-478.
- [287] Bach, C.: *Versuche über Elastizität, Zugfestigkeit, Dehnung und Arbeitsvermögen von Stahlguss*. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* 43 (1899), S.694-696.

- [288] Bach, C.: Versuche über das Arbeitsvermögen und die Elastizität von Gusseisen mit hoher Zugfestigkeit. In: Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Heft 1. Berlin: Springer, 1901, S.49-64,
- [289] Bartz, W.J.: Reibung – Maß aller Dinge. Tribologie+Schmierungstechnik 38 (1991), S.192-201.
- [290] Bartz, W.J.: Zur Geschichte der Tribologie. (Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik. Bd.1). Ehningen bei Böblingen: expert-verlag, 1988.
- [291] Bowden, F.P.; Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper. Berlin u.a.: Springer, 1959.
- [292] Brix: Ueber die Reibung. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes in Berlin 16 (1837), S.129-152, 182-223, 230-277, 306-343; (1838), S.74-89.
- [293] Coulomb, Ch. A.: Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et à la roideur des cordages. Académie des Sciences, 1781.
- [294] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie Handbuch – Reibung und Verschleiss. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 1992.
- [295] EMPA (Hrsg.): Versuche zur Klärung der Frage der Bruchgefahr. Bericht Nr.34. Zürich, 1929.
- [296] EMPA (Hrsg.): Bruchgefahr und Materialprüfung. Bericht Nr.35. Zürich, 1928.
- [297] EMPA (Hrsg.): Der Stahlguss als Baustoff. Bericht Nr.36. Zürich, 1929.
- [298] EMPA (Hrsg.): Das Gusseisen. Bericht Nr.37. Zürich, 1928.
- [299] Eytelwein, D.J.A.: Handbuch der Statik fester Körper. Berlin: Reimer, 1832.
- [300] Fliegner, A.: Zur Beurtheilung der continuierlichen Eisenbahn-Bremsen. Schweizer Bauzeitung 6 (1885), S.19-22.
- [301] Föppl, A.: Ueber die mechanische Härte der Metalle, besonders des Stahls. Annalen der Physik. 3.Folge. 63 (1897), S.103-108.
- [302] Föppl, A.: Reibung in Brückengelenken. Centralblatt der Bauverwaltung 21 (1901), S.197-198.
- [303] Föppl, A.: Vorlesungen über Technische Mechanik. Leipzig u. Berlin: Teubner, 1917.
- [304] Föppl, A.: Vorlesungen über Technische Mechanik. Leipzig u. Berlin: Teubner, 1920.
- [305] Föppl, L.: Neue Ableitung der Hertzschen Härteformeln für die Walze. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 16 (1936), S.165-170.
- [306] Föppl, L.: Der Spannungszustand und die Anstrengung des Werkstoffes bei der Berührung zweier Körper. In: Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 7 (1936), S.209-221.
- [307] Föppl, L.: Die strenge Lösung für die rollende Reibung. München: Leibnitz, 1947.
- [308] Föppl, L.: Mechanik starrer Körper. In: „Hütte“- des Ingenieurs Taschenbuch. 27.Aufl., 1.Bd. Berlin: Ernst & Sohn, 1950, S.311-374.
- [309] Föppl, O.: Das Drücken der Oberfläche von Bauteilen aus Stahl. Stahl und Eisen 49 (1929), S.575-577.
- [310] Franke, J.N.: Ueber die Abhängigkeit der gleitenden Reibung von der Geschwindigkeit. Civilingenieur 28 (1882), S.205-226.
- [311] Galton, D.: On the Effect of Brakes upon Railway Trains. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (1879), S.170-218.
- [312] Gerstner, Fr.: Vergleichung der Kraft und Last beim Räderwerk mit Rücksicht auf die Reibung. Neuere Abhandlungen der Königlichen Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften 1 (1791), S.257-274.
- [313] Gerstner, Fr.J. Ritter v.: Handbuch der Mechanik. Bd.1: Mechanik fester Körper. Prag: Spurny, 1831.
- [314] G.M.: Größe des Reibungs-Beiwertes für verschiedene Geschwindigkeiten. Centralblatt der Bauverwaltung 14 (1894), S.73.
- [315] Gottgetreu, R.: Physikalische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien. 3.Aufl. Berlin: Springer, 1881.
- [316] Grashof, F.: Theorie der Elastizität und Festigkeit. Berlin: Rudolf Gaertner, 1878.
- [317] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für reine und angewandte Mathematik 92 (1881), S.155-171.
- [318] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes (1882). In: Lenard, Ph.: Schriften vermischten Inhalts von Heinrich Hertz. Vaduz: Sändig, 1988, S.174-196.
- [319] Huber, M.T.: Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. Annalen der Physik 14 (1904), S.153-163.
- [320] Juretzek, H.: Legierte Stahlgußgüten, ihre Eigenschaften und Verwendung. Gießerei 29 (1942), S.217-226, 243-249.
- [321] Juretzek, H.: Grundlagen und praktische Durchführung der Wärmebehandlung des Stahlgusses. Gießerei 38 (1951), S.237-248.

- [322] Kimball, A.S.: A new Investigation of one of the Laws of Friction. American Journal of Science (3) 13 (1877), S.353-359.
- [323] Kimball, A.S.: Eine neue Untersuchung über eines der Reibungsgesetze. Annalen der Physik 1 (1877), S.334-336; deutsche Kurzfassung aus [322].
- [324] Klasen, L. (Hrsg.): Handbuch der Hochbau-Constructions in Eisen und anderen Metallen. Leipzig: Wilhelm Engelmann, 1876.
- [325] Knipp, E.: Gasblasen in Gußstücken unter besonderer Berücksichtigung von Stahlguß. Gießerei 22 (1935), S.505-511.
- [326] Lafay, M.A.: Recherches Expérimentales sur les Déformations de Contact des Corps élastiques. Annales de Chimie et de Physique 23 (1901), S.241-288.
- [327] Ledebur, A.: Die Prüfung des Gusseisens. Stahl und Eisen 8 (1888), S.223-224.
- [328] Ledebur, A.: Läßt sich im Cupolofen Stahlguß erzeugen? Stahl und Eisen 9 (1889), S.333-334.
- [329] Ledebur, A.: Ueber Stahlformguß. Stahl und Eisen 11 (1891), S.451-459.
- [330] Ledebur, A.: Handbuch der Eisen- und Stahlgießerei. 3.Aufl. Leipzig: Voigt, 1901.
- [331] Leupold, J.: Theatrum Machinarium. Leipzig: Wolfgang Deer, 1735.
- [332] Müller, Fr. C.G.: Ueber Gasausscheidungen in Stahlgüssen. Stahl und Eisen 2 (1882), S.531-542.
- [333] Nölke, H.: Zur Beanspruchbarkeit bei Hertzschen Pressungen. Stahlbau 78 (2009), S.47-55.
- [334] Parker: Anwendung von Stahlguß an Stelle von Schmiedestücken aus Stahl oder Eisen. Dingler's Polytechnisches Journal 252 (1884), S.127-132.
- [335] Poetter, H.: Stahlguss. Berlin: VEB Verlag Technk, 1955.
- [336] Poirée, M.J.: Note sur la resistance des wagons a freins et sur le frottement de gliss. Memoires de la Societe des Ingenieurs Civils de France (1852), S.110-115.
- [337] Pole, W.: An Investigation of the comperative loss by Friction, in beam and direct action Steam Engines. Civil Engineer and Architect's Journal 6 (1843), S.170-173.
- [338] Prager, W.: Die Fließgrenze bei behinderter Formänderung. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 4 (1933), S.95-97.
- [339] Rennie, G.: Experiments on the friction and abrasion of the surfaces of solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1828), Aug., S.143-170; deutsche Fassung in Dingler's Polytechnisches Journal 34 (1829), S.95-103, 165-194.
- [340] Reuleaux, R.: Konstrukteur. 4.Aufl. Braunschweig: Vieweg, 1882-89.
- [341] Reynolds, O.: On Rolling-Friction. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 166 (1876), S.155-174.
- [342] R.M.D.: Ueber Gusstahl – Façonguss. Stahl und Eisen 1 (1881), S.143-145.
- [343] Rocke, W.: Casting Wrought Iron. Civil Engineer and Architect's Journal 11 (1848), S.216-217.
- [344] Rubensdörffer, Fr.; Siepmann, H.; Zimmermann, K.: Stahlguß. In: Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, 4.Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen m.b.H., 1965, S.J51-1 bis J51-14.
- [345] Schüz, E.: Aus der frühesten Geschichte des Hartgusses. Gießerei 22 (1935), S.22-26.
- [346] Seebohm, H.: Ueber die Darstellung des Tiegelgussstahles. Stahl und Eisen 4 (1884), S.661-665, 708-814.
- [347] Stein, H.; Roesch, K.: Die Schmelzöfen in deutschen Stahlgießereien. Gießerei 36 (1949), S.106-110.
- [348] Tauscher, H.: Dauerfestigkeit von Stahl und Gußeisen. Leipzig: Fachbuchverlag, 1969.
- [349] Tetmajer, L.v.: Die Baumechanik. II.Theil: Die angewandte Elasticitäts- und Festigkeitslehre. Zürich: Zürcher und Furrer, 1889.
- [350] Tetmajer, L.v.: Elasticitäts- und Festigkeitslehre. Leipzig: Deuticke, 1905.
- [351] Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Eisen im Hochbau. 7.Aufl. Berlin: Springer, 1928.
- [352] Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Stahl im Hochbau. 12.Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1953.
- [353] Vereinigte Kugellagerfabriken Aktiengesellschaft Schweinfurt (Hrsg.): Mundt, R.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Eine allgemeinverständliche Darstellung der Theorie von Heinrich Hertz. Berlin: Büxenstein GmbH, 1950.
- [354] Vince, S.: On the Motion of Bodies affected by Friction. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 75 (1785), S.165-189.
- [355] Vogelpohl, G.: Geschichte der Reibung. Eine vergleichende Betrachtung aus der Sicht der klassischen Mechanik. In: Krause, H. (Hrsg.): Technikgeschichte in Einzeldarstellungen, Nr.35. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981, S.1-87.

- [356] Weisbach, J.: Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik. Braunschweig: Vieweg und Sohn, 1845.
- [357] Weisbach, J.: Der Ingenieur – Sammlung von Tafeln, Formeln und Regeln. Braunschweig: Viehweg und Sohn, 1850.
- [358] Winkler, E.: Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit. Prag: Dominicus, 1867.
- [359] Winkler, E.: Deformationsversuche mit Kautschuk-Modellen. Civilingenieur 24 (1878), S.81-100.
- [360] Wöhler: Theorie rechteckiger eiserner Brückenbalken mit Gitterwänden und mit Blechwänden. Zeitschrift für Bauwesen 5 (1855), S.121-166.
- [361] Wolfram, K.: Zum Einfluss von Druckspannungen auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen. Diss. TU Dresden, 2001.

Regelwerke

Lager

- [362] Minister für öffentliche Arbeiten (Hrsg.): Erlaß vom 15.Nov. 1894, I.12757 - Allgemeine Bestimmungen ueber die Ausbildung der Lager eiserner Brücken im Bereich der Preußischen Staatsbahnen. Centralblatt der Bauverwaltung 14 (1894), S.495-496.
- [363] Bayerische Eisenbahnen (Hrsg.): Normale für Stühle und Auflagerplatten v.J. 1900. In: [676/352/f/1-3].
- [364] Normblattentwürfe DIN E 1039: Festes Linienkipplager für Balkenbrücken von 125 t bis 300 t Auflagerdruck. DIN E 1040: Bewegliches Linienkipplager für Balkenbrücken von 125 t bis 300 t Auflagerdruck. Bauingenieur 5 (1924), S.5-7.
- [365] TGL 18 204/02: Gummitopflager, 08/1968.
- [366] TGL 18 204/01: Gummischichtenlager, 04/1978.
- [367] TGL 18 204/02: Gummitopflager, 12/1983, ersetzt [365].
- [368] TGL 24 552/02: Punktkipplager – Tragfähigkeitsnachweis, 05/1972.
- [369] TGL 24 552/01: Punktkipplager – Technische Bedingungen, 01/1987.
- [370] TGL 9098/01: Linienkipplager – Berechnungsgrundlagen, 11/1974.
- [371] TGL 9098/02: Linienkipplager – Abmessungen und Technische Lieferbedingungen, 11/1974.
- [372] TGL 9098/03: Linienkipplager – Tragfähigkeitsnachweis, 11/1974.
- [373] DIN 4141: Lager im Bauwesen. 09/1984.
- [374] pr DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. (Teile der Vornorm eingeführt ab 03/1994).
- [375] DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 1: Allgemeine Regelungen. 02/2001, ersetzt zum Teil [373].
- [376] DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 2: Gleitteile. 07/2004.
- [377] DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 4: Rollenlager, 08/2004.
- [378] DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 6: Kipplager, 08/2004.
- [379] DIN V 4141: Lager im Bauwesen, 05/2003, ersetzt [373].

Brücken- und Hochbau, Material

- [380] Technische Vereinbarungen des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen ueber den Bau und die Betriebseinrichtungen der Eisenbahn. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung 1 (1866), S.1-16.
- [381] Königreich Bayern (Hrsg.): Ministerialentschließung vom 13.Feb. 1878: Vorschriften über Entwurf, Ausführung und Prüfung von Straßenbrücken mit eisernem Überbau. Amtsblatt des k. Staatsministeriums des Innern (1878), Nr.7. In: [678].
- [382] N.N.: Besondere Bedingnisse für die Ausführung eiserner Brückenüberbauten (für Bayern, A.d.Verf.). München, 1885. In: [676/352/f].
- [383] Verbände deutscher Architekten- und Ingenieurvereine unter Mitwirkung des Vereins deutscher Ingenieure und des Vereins deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau, 1886. In: [676/352/f].
- [384] K.k. Statthalterei Baudepartment: Bedingungen für die Lieferung und Aufstellung von eisernen Brücken. Innsbruck, 1888. In: [677/1/94].

- [385] Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Vorschriften für die Lieferungen von Eisen und Stahl. Düsseldorf: August Bagel, 1889.
- [386] K.k. Handelsministerium (Hrsg.): Grundsätzliche Bestimmungen für die Lieferung und Aufstellung eiserner Brücken. Wien: Kaiserlich königliche Hof- und Staatsdruckerei, 1892.
- [387] Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 25.Nov. 1891: Besondere Vertragsbedingungen für Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen. In: Vereinigte Preußische und Hessische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Zusammenstellung allgemeiner Erlasse über eiserne Brücken und Dächer zum Dienstgebrauch. Berlin: H.S.Hermann, 1904. In: [676/352/f].
- [388] Schweizer Post- und Eisenbahndepartement (Hrsg.): Verordnung betreffend Berechnung und Prüfung der eisernen Brücken- und Dachkonstruktionen auf den schweizerischen Eisenbahnen. In: Schweizerische Bauzeitung 20 (1892), S.86-89.
- [389] Verbände deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine, Verein deutscher Ingenieure, Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau. Hamburg: Meissner, 1893; auch: Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 37 (1893), S.364-368.
- [390] Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 1.Okt. 1895 - Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau. In: Centralblatt der Bauverwaltung 15 (1895), S. 485-488.
- [391] Königl. Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Grundlagen für Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen, 1895. In: [676/352/f].
- [392] Königlich Sächsische Staatseisenbahn (Hrsg.): Besondere Bedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen zu Brücken- und Hochbauten vom Jahre 1895. In: [676/352/f].
- [393] Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 19.März 1895 - Vorschriften für die Ueberwachung und Prüfung der Brücken mit eisernem Ueberbau im Bereiche der preußischen Staatseisenbahnverwaltung. In: Centralblatt der Bauverwaltung 15 (1895), S.141-144.
- [394] Verbände deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, dem Vereine deutscher Ingenieure und dem Vereine deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- u. Hochbau. 4.Aufl. Hamburg: Meissner,1895. In: [676/352/f/1-3].
- [395] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn – Eisenbahndirektion Mainz (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen, (verm. um 1896, A.d.Verf.). In: [676/352/f].
- [396] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für die Berechnung der eisernen Brücken der Preußischen Staatseisenbahn-Verwaltung. Berlin: Ernst & Sohn, 1899.
- [397] Königlich Bayerische Staats-Eisenbahn (Hrsg.): Grundlagen für die Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen (In vorläufiger Fassung), 1900. In: [676/352/f].
- [398] Großh. Badische Staatsbahn-Verwaltung (Hrsg.): Vorschriften für die Anordnung und Berechnung eiserner Brücken der Großh. Badischen Staatsbahn-Verwaltung, 1903. In: [676/352/f].
- [399] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den Preußischen Staatseisenbahnen. Berlin: Ernst & Sohn, 1903.
- [400] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 1.Mai 1903 – Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau. In: Zentralblatt der Bauverwaltung 23 (1903), S. 301-305.
- [401] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Zusammenstellung allgemeiner Erlasse über eiserne Brücken und Dächer zum Dienstgebrauch. Berlin: Druckerei S.Hermann, 1904.
- [402] K.Württ. Staatseisenbahnen (Hrsg.): Besondere Bedingungen für die Anfertigung und Aufstellung von Eisenkonstruktionen zum Brücken- und Hochbau, 1904. In: [677//100].
- [403] Königlich Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Ausführung eiserner Brücken- u. Hochbaukonstruktionen. München: Hafner, 1908.
- [404] Verbände deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, dem Vereine deutscher Ingenieure und dem Vereine deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- u. Hochbau. Ausgabe 1910. Deutscher Verband für die Materialprüfungen der Technik Nr.47.
- [405] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn: Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Anlieferung und Aufstellung von Eisenbauwerken. Berlin: Ernst & Sohn, 1912.
- [406] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den preußischen Staatseisenbahnen. 5.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1912.
- [407] Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den preußischen Staatseisenbahnen. 6.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1913.
- [408] DIN 1000: Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenbauwerken, 1921. In: [568/S.9-23].
- [409] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Vorschriften für Eisenbauwerke – Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken (vorläufige Fassung), 1.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1922.

- [410] Erlaß des Reichsverkehrsministers, betr. „Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken“, 21.August 1923, Hier: zulässige Druckspannungen für Berührungsflächen. Bautechnik 1 (1923), S.363.
- [411] DIN E 1072: Strassenbrücken – Belastungsannahmen. In: Baunormung 2 (1923), S.29-31.
- [412] DIN E 1505 Stahlformguß (Stahlguß) 03/1924. In: Baunormung 4 (1924), S.20.
- [413] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für eiserne Brücken (B.E.), 02/1925. Berlin: Ernst & Sohn, 1925.
- [414] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 09/1925. Berlin: Ernst & Sohn, 1925.
- [415] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der Brücken, Hallen und Dächer (B.Ü.P.), 01/1926. Köln: DuMont, 1926. In: [680/A Rep.080, Nr.1628].
- [416] DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für eiserne Straßenbrücken, Vorstandsvorlage 05/1927. In: Baunormung 6 (1927), S.13-22.
- [417] DIN 1681 Stahlguss, 07/1928.
- [418] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (A St Bau). Berlin: Ernst & Sohn, 1929. In: [676/352/f].
- [419] DIN 1076: Richtlinien für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken, 08/1930. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949, S.127-133.
- [420] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 2.Aufl., 01/1931. Berlin: Ernst & Sohn, 1931.
- [421] DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken (Belastungsannahmen siehe DIN 1072), 2.Ausg., 09/1931. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949, S.72-96.
- [422] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE), 3.Aufl., 02/1934. In: [676/352/f].
- [423] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE). 3.Aufl. 06/1936 (Nachdruck der 3.Aufl. mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Ausgabe 1936. In: Zentralblatt der Bauverwaltung 56 (1936), S. 742-819.
- [424] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 806: Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St), 2.Ausgabe 10/1937. In: [670].
- [425] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 3.Aufl., 11/1938. In: [670].
- [426] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Technische Vorschriften für Stahlbauwerke (TVSt) 05/1935. 10.Aufl. mit Änderungen in den §§5,8,11. Nachdruck 1938. In: [676/352/f].
- [427] DIN 1079: Stählerne Straßenbrücken. Grundsätze für die bauliche Durchbildung, 11/1938. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949.
- [428] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE) 02/1934, (Nachdruck der 3.Auflage mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Ausgabe 1939. In: [670].
- [429] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804a: Tafeln zur Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken nach den Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) von 1934, Ausgabe 1939. In: [670].
- [430] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE) 02/1934, Ausgabe 1940 (mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Nachdruck 1940. In: [676/352/f].
- [431] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804a: Tafeln zur Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken nach den Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE),1934, Ausg.1940. In: [676/352/f].
- [432] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 806: Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St), 2.Ausgabe 10/1937. Nachdruck 1940. In: [670].
- [433] DIN 1050: Berechnungsgrundlagen für Stahl im Hochbau. 07/1937. In: Wedler, B.: Berechnungsgrundlagen für Bauten. 21.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1948.
- [434] DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken, 3.Ausg., 01/1941. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949.
- [435] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 3.Aufl. Ausgabe 1943, Nachdruck 1955. In: [670].
- [436] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1944. In: [670].
- [437] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 827: Technische Vorschriften für Stahlbauwerke (TVSt) 05/1935. 10.Aufl. Ausgabe 1955 mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern. In: [670].

- [438] Deutsche Bundesbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 12/1955. In: [670].
- [439] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Dv 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift) und Teil II (Tafeln), 02/1963. In: [670].
- [440] Deutsche Bundesbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift), 10/1951, Ausgabe 1965 mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern. In: [676/352/f].
- [441] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804/100: Richtlinien für die Nachrechnung stählerner Eisenbahnbrücken, 10/1966. In: [670].
- [442] DIN 1079: Stählerne Straßenbrücken. Grundsätze für die bauliche Durchbildung, 09/1970. In: [670].
- [443] Deutsche Bundesbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 12/1955, Ausgabe 1973. In: [670].
- [444] Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Dienstvorschrift für die Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken (BE), 09/1979. In: [670].
- [445] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken. 12/1985.
- [446] DIN 18 809: Stählerne Straßen- und Wegbrücken. 09/1987, (Ersatz für DIN 1073).
- [447] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 805: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken, 01/1997.
- [448] FKM-Richtlinie (FKM-Ri): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisen- und Aluminiumwerkstoffen. 5.Aufl. Frankfurt a.M.: VDMA Verlag GmbH 2003.

Kommentare, Allgemeines

- [449] Braun, Chr.; Hansville, G.; Porsch, M.; Schürmann, Chr.: Lager im Bauwesen nach DIN EN 1337. Stahlbau 78 (2009), S.849-868.
- [450] Bohny: Die neuen Vorschriften der Reichsbahn für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken. Zentralblatt der Bauverwaltung 42 (1922), S.306-310, 320-323.
- [451] Ebert: Ueber zulässige Beanspruchungen von Eisenkonstruktionen. Deutsche Bauzeitung 30 (1896), S.13-15, 24-27, 35-38, 47-50.
- [452] Eggert, H.: Brückenlager und deren Regelung. Bautechnik 78 (2001), S.52-59.
- [453] Ellerbeck: Normen für Straßenbrücken – Belastungsannahmen. Bautechnik 1 (1923), S.313.
- [454] Ernst: Die neuen Vorschriften für Eisenbauwerke der deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Bautechnik 3 (1925), S.204-207.
- [455] Gehler: Die neuen Vorschriften für Eisenbahnbauwerke der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Bauingenieur 7 (1926), S.64-69.
- [456] Hoffmann, P.: Bemerkungen zur Überwachung und Unterhaltung von eisernen Brücken und anderen Kunstbauten. Zentralblatt der Bauverwaltung 40 (1920), S.621-623.
- [457] Karig, J.: Vorschlag für ein einheitliches Brückenlager. Bautechnik 1 (1923), S.357-60, 416-20, 428-33.
- [458] Karig, J.: Vorschlag für ein einheitliches Brückenlager. Bautechnik 3 (1925), S.254-257, 267-270.
- [459] Kirchner, H.: Vorschläge für ein einheitliches Brückenlager. Bautechnik 2 (1924), S.189-192.
- [460] Kirchner: Normblattentwürfe – DIN E 1039 [...] DIN E 1040 [...]. Baunormung 3 (1924), S.5-7.
- [461] Ko.: Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken. Bautechnik 3 (1925), S.22.
- [462] Kollmar, A.; Jacoby, K.: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) – Neuerungen der Ausgabe 1951. Stahlbau 23 (1954), S.3-15.
- [463] Kuhnke: Lastenzüge und zulässige Beanspruchungen für die Berechnung von Eisenbahnbrücken. Zentralblatt der Bauverwaltung (1923), S.557-560.
- [464] Mertens, W.: Über technische Baupolizeibestimmungen und die Möglichkeit und Notwendigkeit ihrer Vereinheitlichung. Diss. TH Dresden, 1919.
- [465] Mertz: Zur Entstehung und Entwicklung der „Technischen Vereinbarungen“. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 91 (1936), S.444-447.
- [466] Neustätter, A.: Über das Brückenüberwachungs- und Unterhaltungswesen. Zentralblatt der Bauverwaltung 41 (1921), S.206-207.
- [467] Oeser: Vorschriften für Eisenbauwerke. Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken (B.E.). Bautechnik 3 (1925), S.207.
- [468] Ollert: Erläuterungen zu den Normblattentwürfen über feste und bewegliche Lager für Balkenbrücken DIN E 1037 bis DIN E 1040. Baunormung 12 (1933), S.1-8.

- [469] RW Sollinger Hütte (Hrsg.): Brückenlager – Zum Stand der Normungen in Deutschland.. Info 01/2008. S.3-13.
- [470] Säckel, R.: Erläuterungen zur Dv 804/100 „Richtlinie für die Nachrechnung stählerner Eisenbahnbrücken“. Signal und Schiene 12 (1968), S.234-236, 282-285.
- [471] Sammlung handschriftlicher Abschriften von Erlässen des Ministers für öffentliche Arbeiten, Preußen. In: [676/352/f].
- [472] Sammlung von Musterentwürfen für Stahlgussbrückenlager, aufgestellt vom „Stahlbau Dessau“ um 1956. In: [671].
- [473] Sander: Stand der Normungsarbeiten im Bauwesen am 1.Oktober 1922. Bauingenieur 3 (1922), S.2-3.
- [474] Sander: Normung und Typung im Bauwesen und ihre Einführung in die Praxis. Baunormung 4 (1925), S.61-63.
- [475] Sander: 25 Jahre Deutsche Baunormung. Bauingenieur 23 (1942), S.373-378.
- [476] Schaechterle: Vorschriften der deutschen Reichsbahn für Eisenbauwerke. Bautechnik 1 (1923), S.29-32, 36-38.
- [477] Schmidt, Technischer Leiter des „Stahlbau Dessau“: Schreiben von 1963 an die Reichsbahndirektion Cottbus. In: [671].
- [478] Sonntag, R.: Die neuen Vorschriften für Eisenbauwerke der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Zentralblatt der Bauverwaltung 45 (1925), S.321-352.
- [479] Sonntag, R.: Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Zentralblatt der Bauverwaltung 46 (1926), S.18-20.
- [480] Stein: Lager für Balkenbrücken – DIN 1037 bis 1040. Baunormung 12 (1933), S.21.
- [481] Wagner, K.: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Straßenbrücken. Zentralblatt der Bauverwaltung 58 (1938), S.399-406.
- [482] Wedler: Die Normen für Straßenbrücken. Bautechnik 7 (1929), S.193-196.
- [483] N.N.: Die vom K.K. Oesterreichischen Handels-Ministerium genehmigten grundsätzlichen Bestimmungen für die Lieferung und Aufstellung eiserner Brücken. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung 48 (1893), S.144-146.
- [484] N.N.: Angelegenheiten des Vereins – Lieferungsbedingungen für Flußeisen. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 36 (1892), S.1233, 1302.
- [485] N.N.: Bedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen zu Brücken und Hochbauten der Kgl. Sächsischen Staatseisenbahnen. Schweizerische Bauzeitung 24 (1894), S.32.
- [486] N.N.: Die neuen Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der eisernen Brücken im Bereiche der Preußischen Staatseisenbahnverwaltung. Zentralblatt der Bauverwaltung 15 (1895), S.148.

Kontext

- [487] Addis, B.: Building: 3000 Years of Design Engineering and Constuction. London u.a.: Phaidon, 2007.
- [488] Armytage, W.H.G.: A Social History of Engineering. London: Faber and Faber, 1961.
- [489] Aurnhammer, G.: Dr.-Ing. A. Kollmar (Nachruf). Stahlbau 40 (1971), S.351.
- [490] B: Professor D. Emil Winkler (Nachruf). Deutsche Bauzeitung 22 (1888), S.434-436.
- [491] Bäumel, A.: Experimentelle und numerische Untersuchung der Schwingfestigkeit randschichtverfestigter eigenspannungsbehafteter Bauteile. Diss. TH Darmstadt, 1991.
- [492] Beckett, Derrick: Stephenson's Britain. Guildford: David & Charles, 1984.
- [493] Behnke, W. et al.: 100 Jahre Funktechnik in Deutschland, 3.Aufl. Dessau: Funk Verlag, 2004.
- [494] Billington, D.P.: Robert Maillart und die Kunst des Stahlbetonbaus. Zürich u.a.: Verlag für Architektur Artemis, 1990.
- [495] Bischoff, J.: Vorwärts durch Raum und Zeit. In: Gaede, P.-M. (Hrsg.): Die Industrielle Revolution – Wie Dampf, Stahl und Strom die Welt veränderten. GeoEpoche Nr.30 (2008), S.56-71.
- [496] Braun, H.-J.: Methodenprobleme der Ingenieurwissenschaft, 1850-1900. Technikgeschichte 44 (1977), S.1-18.
- [497] Brühl, P.: Die Geschichte des modernen Kugellagers. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 53 (1909), S.1844-1849, 1887-1889.
- [498] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.): 125 Jahre Forschung und Entwicklung, Prüfung, Analyse, Zulassung, Beratung und Information in Chemie- und Materialtechnik. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1996.

- [499] Carstanjen: Heinrich Gerber (Nachruf). Deutsche Bauzeitung 46 (1912), S.74-78.
- [500] Curbach, M.; Bösch, Th.: Auf dem Wege zur integralen Bauweise. In: Mehdorn, H.; Schwinn, K.H. (Hrsg.): Eisenbahnbrücken – Ingenieurbaukunst und Baukultur. Media Group GmbH, 2009, S.163-172.
- [501] Desberger: Ueber die industriellen Anstalten in Gmund bei Tegernsee. Vaterländisches Magazin für Belehrung, Nutzen und Unterhaltung (1841), S.254-271.
- [502] Dienel, H.-L.: Herrschaft über die Natur? Naturvorstellungen deutscher Ingenieure 1871-1914. 2.Aufl. Bassum: Verl. für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik, 1997.
- [503] Dieterich, R.: Ludwig Werder. Technikgeschichte 35 (1968), S.148-159.
- [504] Fesser, G.: Die Kaiserzeit – Deutschland 1871-1918. In: Landeszentrale für politische Bildung Thüringen. Erfurt, 2000.
- [505] Föppl, A.: Die neuen Träger-Systeme für eiserne Brücken. Ein Beitrag zur Theorie des Brückenbaues. Leipzig: G. Knapp, 1878.
- [506] Föppl, O.; Heydekampf, G.v.: Dauerfestigkeit und Konstruktion. Metall-Wirtschaft, -Wissenschaft und -Technik 8 (1929), S.1087-1094.
- [507] Gehler, W.: Balkenbrücken. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1931. (Emperger, Fr. (Hrsg.): Handbuch für Eisenbetonbau. 6.Bd.: Balkenbrücken. 3.Aufl.).
- [508] Geißler, K.; Graße, W.; Brandes, Kl.: Bewertung bestehender Stahlbrücken. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2006. Berlin: Ernst & Sohn, 2006, S.486-548.
- [509] Gesellschaft Harkort Duisburg (Hrsg.): 75 Jahre Deutscher Brückenbau. Duisburg: Carl Lange, 1922.
- [510] Gesteschi, Th.: Bogenbrücken und Überwölbungen. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1921. (Emperger, Fr. (Hrsg.): Handbuch für Eisenbetonbau. 7.Bd.: Bogenbrücken und Überwölbungen. 3.Aufl.).
- [511] Gießbach: Die Funktürme in Berlin-Adlershof. Bautechnik 5 (1927), S.31.
- [512] Gräfe, R.: Zur Geschichte des Konstruierens. Wiesbaden: Fourier, 1989.
- [513] Gramm, H.: Eisen und Stahl. Leipzig: Fachbuchverlag, 1955.
- [514] Greif, S.; Potkowik, G.: Patente und Wirtschaftszweige. Köln u.a.: Carl Heymanns Verlag KG, 1990.
- [515] Hartung, K.; Preuß, E.: Deutsche Eisenbahnen – Chronik 1835-1995. Stuttgart: transpress-Verlag, 1996.
- [516] Hertwig, A.: Johann Wilhelm Schwedler – Sein Leben und sein Werk. Berlin: Ernst & Sohn, 1930.
- [517] Holland: Johann M. Mannhart, Mechaniker und Uhrmacher. Allgemeine Deutsche Biographie 20.Bd. Leipzig, 1884.
- [518] Holzer, St.M.: Der Bogen im Dach. Zur Entwicklung des weitgespannten Daches 1770-1840 unter dem Einfluß des frühen Bauingenieurwesens. Bautechnik 84 (2007), S.130-146.
- [519] Howe, H.M.; Sauveur, A.: Über die einheitliche Nomenklatur von Eisen und Stahl. Internationaler Verband für die Materialprüfungen der Technik, V.Kongress, Kopenhagen 1909, Abschn. VIII₂.
- [520] Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung (Hrsg.): Patentwesen und technischer Fortschritt – Teil 1: Die Wirkung des Patentwesens im Innovationsprozess. Göttingen: Otto Schwartz & Co., 1974.
- [521] Jurecka, Ch.: Brücken. 2.erw. Aufl. München, Wien: Anton Schroll & Co., 1986.
- [522] Kaiser, W.; König, W.: Geschichte des Ingenieurs – Ein Beruf in sechs Jahrtausenden. München, Wien: Hanser, 2006.
- [523] Kentley, E.; Hudson, A.; Peto, J. (Eds.): Isambard Kingdom Brunel: Recent Works. Catalogue to accompany the Exhibition of the same name at the Design Museum. London: Design Museum, 2000.
- [524] Klee, W.: Preußische Eisenbahngeschichte. Stuttgart u.a.: Kohlhammer, 1982.
- [525] Klemm, Fr.: Die Rolle der Mathematik in der Technik des 19. Jahrhunderts. Technikgeschichte 33 (1966), S.72-96.
- [526] Klenze, L.v.: Sammlung Architectonischer Entwürfe welche ausgeführt, od. für die Ausführung entworfen wurden. München: Literarisch artistische Anstalt, 1830-1850.
- [527] Krankenhagen, G.; Laube, H.: Werkstoffprüfung. Hamburg: Rowohlt, 1983.
- [528] Krauss, Fr.; Führer, W.; Neukäter, H.J.: Grundlagen der Tragwerkslehre 1. Köln: Rudlof Müller, 2007.
- [529] Krieger, R.: Die Entwicklung der deutschen Stahlformguß-Industrie in den letzten 25 Jahren. Stahl und Eisen 46 (1926), S.697-706, 865-869.
- [530] Krings, U.: Bahnhofsarchitektur. Deutsche Großstadtbahnhöfe des Historismus. München: Prestel, 1985.
- [531] Kulka: Die Streckgrenze als Berechnungsgrundlage für den Konstrukteur. Stahlbau 1 (1928), S.6-9.
- [532] Kurrer, K.-E.: Stahl+Beton=Stahlbeton? Stahl+Beton=Stahlbeton! Die Entstehung der Triade von Verwaltung, Wissenschaft und Industrie im Stahlbetonbau in Deutschland. Beton- und Stahlbetonbau 92 (1997), S.13-18, 45-49.

- [533] Kurrer, K.-E.: Der Beitrag Emil Winklers zur Herausbildung der Klassischen Baustatik. In: Gesellschaft von Freunden der TU Berlin (Hrsg.): Humanismus und Technik. Jahrbuch 1987. Berlin: Gerhard Weinert, 1988, S.11-39.
- [534] Kurrer, K.-E.: Geschichte der Baustatik. Berlin: Ernst & Sohn 2002.
- [535] Kurrer, K.-E.: Julius Weisbachs „Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik“ im Goldenen Schnitt der Beiträge Gerstners und Föppls. In: TU Bergakademie Freiberg (Hrsg.): Julius L. Weisbach (1806-1871). Gedenkschrift zu seinem 200. Geburtstag. Freiburger Forschungsforum 2006, S.25-67.
- [536] Kurrer, K.-E.: Der Enzyklopädist der Technischen Mechanik des 19. Jahrhunderts – Zum 200. Geburtstag von Julius Weisbach (1806-1871). Bautechnik 83 (2006), S.868-875.
- [537] Ledebur, A.: Der Gießereibetrieb am Ende des neunzehnten Jahrhunderts. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 43 (1899), S.433-448.
- [538] Lehmann, Chr.; Maurer, B.: Karl Culmann und die graphische Statik. Berlin: Ernst & Sohn, 2006.
- [539] Locke, R.R.: The End of the Practical Man. Entrepreneurship and Higher Education in Germany, France, and Great Britain, 1880-1940. London: Jai Press inc., 1984.
- [540] Lohse, U.: Die geschichtliche Entwicklung der Eisengießerei seit Beginn des 19. Jahrhunderts. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie 2 (1910), S.90-147.
- [541] Lorenz, W.: Konstruktion als Kunstwerk. Bauen mit Eisen in Berlin und Potsdam 1797-1850. Berlin: Gebr. Mann Verlag, 1995.
- [542] Manegold, K.-H.: Technische Forschung und Promotionsrecht. Technikgeschichte 36 (1969), S.291-300.
- [543] Manegold, K.-H.: Universität, Technische Hochschule und Industrie. Berlin: Duncke & Humblot, 1970.
- [544] Manegold, K.-H.: Das Verhältnis von Naturwissenschaft und Technik im 19. Jahrhundert im Spiegel der Wissenschaftsorganisation. In: Treue, W.; Mauel, K.: Naturwissenschaft, Technik und Wirtschaft im 19. Jahrhundert. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1976, S. 252-283.
- [545] Mörsch, E.: Der Eisenbetonbau – seine Theorie und Anwendung. 4.Aufl. Stuttgart: Wittwer, 1912.
- [546] Mörsch, E.: Der Eisenbetonbau – seine Theorie und Anwendung. 6.Aufl. Stuttgart: Wittwer, 1929.
- [547] Mörsch, E.: Der Eisenbetonbau – seine Theorie und Anwendung. 5.Aufl., II.Bd., 2.Teil: Die Brücken aus Eisenbeton. Stuttgart: Wittwer, 1933.
- [548] Mortensen, M.: Anwendungsmöglichkeiten der Vorspannung im Stahlleichtbau. Bauplanung-Bautechnik 23 (1969), S.422-426.
- [549] Mottek, H.: Wirtschaftsgeschichte Deutschlands. Berlin: Verlag der Wissenschaften, 1974.
- [550] Mucha, A.: Holzbrücken. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1995.
- [551] Oder.: Luigi Vianello (Nachruf). Zeitschrift der Bauverwaltung 27 (1907), S.452.
- [552] Overman, Fr.: A Treatise on Metallurgy. 3.Ed. New York: D Appleton & Company, 1855.
- [553] Paschke, M.: Eisen in geschichtlicher Darstellung. Gießerei 22 (1935), S.553-561.
- [554] Peters, T.F.: Transition in Engineering. Basel, Boston: Birkhäuser, 1987.
- [555] Peters, T.F.: Building the Nineteenth Century. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1996.
- [556] Peters, T.F.: Patterns of Thought as Contribution to Design and Construction. In: Kurrer, K.-E.; Lorenz, W.; Wetzck, V.: Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009, S.1171-1178.
- [557] Petersen, Chr.: Stahlbau. 2.Aufl. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 1990.
- [558] Pfau, H.: Eine neue Sendegeneration. Der erste Großsender für Leipzig auf dem Ausstellungsgelände im Jahre 1926. Triangel <Leipzig> 3 (1998), S.100-115.
- [559] Picon, A. (Ed.): L'Art de l'ingénieur. Constructeur, entrepreneur, inventeur. Paris: Éditions du Centre Pompidou, 1997.
- [560] Pottgießer, H. : Eisenbahnbrücken aus zwei Jahrhunderten. Basel u.a.: Birkhäuser, 1985.
- [561] Raboldt, K. Zum Beitrag Claus Koepkes zum Stahlbrückenbau. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule f. Architektur und Bauwesen Weimar 17 (1970), S.489-497.
- [562] Rosenberg, N.; Vincenti, W. G.: The Britannia Bridge: The Generation and Diffusion of Knowledge. Cambridge u.a.: MIT Press, 1978.
- [563] Schaechterle, K.W.: Verstärkung, Umbau und Auswechslung von Eisenbahnbrücken. Berlin: VDI-Verlag, 1926.
- [564] Schaechterle, K.: Gottwalt Schaper (Nachruf). Bautechnik 20 (1942), S.21-22.
- [565] Schimank, H.: Theoretiker und Praktiker in Naturwissenschaft und Technik. In: Treue, W.; Mauel, K. (Hrsg.): Naturwissenschaft, Technik und Wirtschaft im 19. Jahrhundert. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1976, S.919-945.
- [566] Schleicher, F.: Dr.-Ing. Alfred Kollmar. Bauingenieur 31 (1956), S.154-155.

- [567] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (Hrsg.): Einheitliche Nomenclatur und Classification von Bau- und Constructionsmaterialien. I.Theil: Eisen und Stahl. Hottingen-Zürich: Zürcher, 1883.
- [568] Stahlwerksverband (Hrsg.): Eisen im Hochbau. 6.Auflage. Berlin: Springer, 1923.
- [569] Stiglat, Kl.: Brücken am Weg. Berlin: Ernst & Sohn, 1997.
- [570] Stummer, v.: Vereinsangelegenheiten – Zur General-Versammlung des Vereins Deutscher Eisenbahn-Verwaltungen im Haag, im Juli 1877. Commissionsbericht zu Nr.II der Tages-Ordnung, betreffend die Classification von Eisen und Stahl. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 15 (1878), S.33-34; Anhänglich und herausgegeben von der technischen Commission des Vereins: Denkschrift über die Einführung einer staatlich anerkannten Classification von Eisen und Stahl. S.35-38.
- [571] Sutherland, R.J.M.: The Introduction of Structural Wrought Iron. Transactions 36 (1963), S.67-84.
- [572] Tetzlaff, I.: Gerhard Mensch. Bauingenieur zwischen Moderne und Nationalsozialismus. Masterarbeit am Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung. BTU Cottbus, 2001.
- [573] Thum, A.; Wunderlich, F.: Die Fließgrenze bei behinderter Formänderung. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 3 (1932), S.261-270.
- [574] Timoshenko, St. P.: History of Strength of Materials. New York: Dover Publ., 1983.
- [575] Treue, W.: Das Verhältnis der Universitäten und Technischen Hochschulen zueinander und ihre Bedeutung für die Wirtschaft. In: Lütge, Fr. (Hrsg.): Forschungen zur Sozial- und Wirtschaftsgeschichte. Bd.6: Die wirtschaftliche Situation in Deutschland und Österreich um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert. Stuttgart: Gustav Fischer, 1964, S.223-237.
- [576] Treue, W.: Christian Peter Wilhelm Friedrich Beuth. In: Treue, W.; Gründer, K. (Hrsg.): Berlinische Lebensbilder, Bd.3: Wissenschaftspolitik in Berlin. Berlin: Colloquium Verlag, 1987, S.119-134.
- [577] Werner, Fr.; Seidel, J.: Der Eisenbau – Vom Werdegang einer Bauweise. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1992.
- [578] N.N.: Einheitliche Benennung der im Eisenbahnbetriebe zur Verwendung kommenden, aus Eisen oder Stahl bestehenden Materialien. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 26 (1889), S.201-202.

Patente

Deutschland

- [579] 1878, 2.August: Nr. 5041; Scharowsky, C.: Neuerungen an Brücken mit continuierlichen Bogenketten-trägern. In: [693/DE 0000 0000 5041A].
- [580] 1878, 18.September: Nr. 4926; Jebens: Auflager für Brückenträger, welche um eine vertikale Axe drehbar sind. In: [693/DE 0000 0000 4926A].
- [581] 1878, 11.Dezember: Nr. 6482; Geng, M.: Neuerungen von Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Kombination von Kugel und Schraube oder von Kugel, Schraube und Pendel. In: [693/DE 0000 0000 6482A].
- [582] 1879, 25.März: Nr. 8646; Geng, M.: Verbesserungen an Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Combination von Kugel und Schraube oder Kugel, Schraube und Pendel. In: [693/DE 0000 0000 8646A].
- [583] 1879, 11.November: Nr. 9600; Geng, M.: Verbesserungen an Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Combination von Kugel und Schraube oder Kugel, Schraube und Pendel. In: [693/DE 0000 0000 9600A].
- [584] 1881, 3.Juli: Nr. 16467; Bährecke: Schublager für Brücken- und Dachconstructions. In: [693/DE 0000 001 6467A].
- [585] 1889, 22.März: Nr. 48557; Offermann, C.: Keilförmige Auflager für continuierliche Gelenkträger. In: [693/DE 0000 0004 8557].
- [586] 1896, 2.Juli: Nr. 97425; Westwood, A.: Auflager für Träger, Binder u.dgl. In: [693/DE 0000 0009 7425A].
- [587] 1900, 3.August Nr. 123912; Bernhard, C.: Standsicheres Trägerauflager mit beweglichen Stützen (Pendeln, Stelzen, Rollen). In: [693/DE 0000 0012 3912A].
- [588] 1901, 27.Juli: Nr. 148575; Ghira, A.: Auflageranordnung für Brückenträger. In: [693/DE 0000 0014 8575A].
- [589] 1906, 12.Juni: Nr. 192641; Bernhard, K.: Bewegliche Lager für Brücken und ähnliche Bauwerke. In: [693 / DE 0000 0019 2641A].
- [590] 1910, 3.April: Nr. 232519; Thieme, J.: Gemeinsame Lagerung aneinanderstoßender Träger. In: [693/DE 0000 0023 2519A].

- [591] 1923, 11.Juli; Nr. 398249; Rasch, E.: Auflagerung von Bückenträgern für die Auswechslung schadhaf-ten Auflagermauerwerks an Brückenpfeilern und sonstigen Widerlagern. In: [693/DE 0000 0039 8249A].
- [592] 1925, 22.April: Nr. 519366; Schmücking, G.: Mittels eines oder mehrerer Keile nachstellbares Stützlager zum Heben und Senken von Bauwerken. In: [693/DE 0000 0051 9366A].
- [593] 1927, 23.August: Nr. 529 886; Burkhardt, E.: Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen. In: [693/ DE 0000 0052 9886A].
- [594] 1931, 20.Januar: Nr. 534917; Aktien-Gesellschaft für Eisenindustrie und Brückenbau vormals Johann Caspar Harkort Duisburg: Längs- und querbewegliches Walzenlager. In: [694/DE534917].
- [595] 1932, 25.Mai: Nr. 595405; Jüngling, A.; Frenz, L.: Brückenrollenlager mit geneigten Wälzflächen. In: [693/ DE 000000595405].
- [596] 1932, 31. Dezember; Nr. 651947; Fritz, B.: Auswechselbares Stahlgelenk für Bogenbrücken. In: [693/ DE 0000 0065 1947A].
- [597] 1936, 5.Juni: Nr. 678740; Burkhardt, E.: Rollenlager für Brücken. In: [693/DE 0000 0067 8740A].
- [598] 1937, 23.März: Nr.685242; Kammüller, K.: Drehgelenk für Gewölbe und Rahmen. In: [693/DE 0000 0068 5242A].
- [599] 1937, 19.August: Nr.698913; Schönhöfer, R.: Bewegliches Auflager mit Kugeln, insbesondere für Brücken. In: [693/DE 0000 0069 8913A].
- [600] 1940, 22.Februar: Nr. 712801; Schönhöfer, R.: Bewegliches Auflager. In: [693/DE 0000 0071 2801A].
- [601] 1941, 29.Mai: Anmeldung von Nr.1024108; Schönhöfer, M.: Auflager für Tragwerke, insbesondere Brücken mit großer Tragfähigkeit. In: [693/DE 0000 0102 4108A].
- [602] 1942, 12.Dezember: Nr.941798; Georgensgmünd, G.L.: Allseitig bewegliches Brückenlager. In: [693 /DE 0000 0094 1798B].
- [603] 1946, 2.Okt.: Nr.879937; Schönhöfer, R.: Führung für pendelnd sich bewegende Wälzkörper. In: [693 /DE 0000 0087 9937B].
- [604] 1948, 2.Oktober: Nr.810333; Bezold, H.v.: Pendelstütze. In: [693/DE 0000 0081 0333B].
- [605] 1949, 4.August: Nr.826597; Steatit-Magnesia A.G.: Elektrisch isoliertes Brückenlager. In: [693/DE 0000 0082 6597B].
- [606] 1950, 17.Mai: Nr.812559; Burkhardt, E.: Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen. In: [693/DE 0000 0081 2559B].
- [607] 1951, 30.Juni: Nr.973210; Kammüller, K.: Lagerkörper aus Stahlbeton für Brücken oder Bauten aller Art aus Stahl oder Stahlbeton. In: [693/DE 0000 0097 3210B].
- [608] 1962, 10.November: Nr.1870839; Manfred Kreutz GmbH: Punktkipplager für Brückenbauwerke od. dgl. In: [693/DE 0000 0187 0839U].

Großbritannien

- [609] 1889, 12.November: No.18,054; Westwood, C.J.; Rigby, H.: Hinged Expansion Gear for Bridges. Originaldokument lag nicht vor, aber Verweis in: [693/US 0000 0048 0863A].
- [610] 1895, 4.Dezember: No.23,212; Westwood, A.: Means for supporting Ends of Girders. In: [694/ GB 189523212].
- [611] 1898; No.22262: Patentschrift lag nicht vor, aber Auflistung bei Suchanfrage in [693/Suchanfrage GB/PC AND ,E01D19/04'/IPC].
- [612] 1899, 6.Mai: Watts; No.14,080; Watts, W.G.: Improvements in Bearings for Bridges, Girders, and Principals. In: [694/GB 189814080].
- [613] 1899; No.3930: Patentschrift lag nicht vor, aber Auflistung bei Suchanfrage in [693/Suchanfrage GB/PC AND ,E01D19/04'/IPC].
- [614] 1903, 3.Dezember: No.919; Ward, G.: Improvements in Movable or Expansion Bearings for Bridges o other Structures. In: [694/GB 190300919].
- [615] 1911, 21.September: No.191108210, Thieme J.: Joint Support of Contiguous Beams. In: [693/GB 00089 0018054A].
- [616] 1912, 3.Oktober: No.13,653; Lavington Nowell, J.F.; Nicholas, J.S.: Improvements in or relating to Metal Beams or Girders. In: [694/GB 13653].
- [617] 1916, 10.Januar: No.351; Pelnard-Considère, L.: Improvements in or relating to Bridges. In: [694/ GB 351].
- [618] 1930, 23.Januar: No.303,445; Bauer, Br.: An Expansion Joint for Concrete Structures. In: [694/ GB 303445].

Frankreich

- [619] 1920, 3.Juli : No.507,751; Rabut, Ch.: Support élastique pour poutres continues. In: [693/ FR 00000507751A].
- [620] 1943, 22.Februar : No.882,277; Hilgers A.G.: Pièce de portée à grand pouvoir portant. In: [693/ FR 00000882277A].
- [621] 1947, 10.Februar : No.922,771; Berthaud, L.-P.-E.: Articulation pour ponts et charpentes. In: [693/ FR 00000922771A].
- [622] 1950, 12.April : No.968,235; Kammüller, K.: Appui de pont à articulation en béton armé. In: [693/ FR 00000968235A].
- [623] 1955, 25.Mai: No.1,110,285; Freyssinet, E.: Dispositif de liaison élastique à un ou plusieurs degrés de liberté. In: [693/ FR 00001110285A].

USA

- [624] 1892, 16. August: No.480,863; Westwood, C.J.; Rigby, H.: Hinged Expansion Gear for Bridges. In: [693/ US 0000 0048 0863A].
- [625] 1897, 2.November: No.592,852; Westwood, A.: Means for supporting Ends of Girders. In: [693/ US 0000 0059 2852A].
- [626] 1906, 2.Januar: No.809,071; Motley, P.B.: Means for supporting the Expansion Ends of Bridges. In: [693 / US 0000 0080 9071A].
- [627] 1920, 3.Februar: No.1,329,643; Thomas, W.M.: Reinforced Concrete Bridge Construction. In: [694/ US 132643].
- [628] 1920, 19.Oktober: No.1,356,025; Thomas, W.M.: Arch Construction for Concrete Bridges. In: [693/ US 000001356025A].
- [629] 1922, 8.August: No.1,425,320; Drake, R.Z.: Bridge Shoe. In: [693/ US 000001425320A].
- [630] 1925, 17.November: No.1,562,312; Draper, Ch.F.: Roller Bearing. In: [694/ US 1562312].
- [631] 1930, 11.November: No.1,781,517; McKeown, J.L.: Expansion Bearings. In: [693/ US 000001781517A].
- [632] 1942, 28.April: No.2,281,364; MacDonald, A.F.: Moment Distributing Bearing. In: [694/ US 2281364].

Sonstige

Nachschlagewerke

- [633] Encyclopaedia Britannica or Dictionary of Arts, Sciences, and general Literature. 8 Ed. Vol. XII. Edinburgh: Adam and Charles Black, 1856.
- [634] Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Theil. 1.Aufl. Berlin: Ernst & Korn, 1857.
- [635] Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Abtg. 18.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1902.
- [636] Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Abtg. 19.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1905.
- [637] Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Bd. 27.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1950.
- [638] Peter, N.: Lexikon der Bautechnik. Heidelberg: C.F. Müller, 2001.
- [639] Quak, K.: Technisches Wissen – Technische Stoffe I. Leipzig: Fachbuchverlag, 1951.
- [640] Schneider, Kl.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure. 11.Aufl. Düsseldorf: Werner, 1994.

Statische Berechnungen, Gutachten, Zeichnungen

- [641] 1859: Details of Iron Bridge over Lake – Section and Plan of movable Abutment [...], March 30th 1859. In: [684/DPR 370].
- [642] 1863: Brücke über den Alten Rhein bei Griethausen, Teil A: Erläuterungen zum Entwurf der Eisenconstruction, Teil B: Spezielle Gewichts-Berechnung der Eisenconstruction, Statische Berechnung der Eisenconstruction. In: [681/ Best.1028, Nr.408, Bl.36 - 48-8].
- [643] 1952: Entwurfsbüro Deutsche Reichsbahn, Außenstelle Cottbus: Stahlgußlager für die Brücke im km 118,2 der Strecke Berlin-Görlitz, B.V. Spreebrücke Kiekebusch/Ausführungszeichnung, 07.12.1952, In: [670].

- [644] 1985: VEB Stadtdirektion Straßenwesen Dresden, Abt. Brücken, Brücken-Nr. 1231/1: Blasewitzer Pylon, unterer Teil. Abzeichnung von Lichtpause vom Jahre 1891 im Oktober 1985 durch Geodäsie u. Kartographie Dresden. In: [688].
- [645] 2004: Wiewecke, F.: Untersuchungsbericht Nr. 1031 a/04 zu den Lagern der Hochbahnlinie U2 in Berlin, Prenzlauer Berg, 09/2004, (unveröffentlicht), In: [689].

Audiovisuelle, mündliche und sonstige Materialien

- [646] Gentz, E.: Mitarbeiter Deutsche Bahn AG. E-Mail vom 12.08.2006.
- [647] Grote, J.: Brief vom 21.10.2006 und ergänzendes Telefonat am 22.11.2006.
- [648] Grote, J.: Brief vom 13.12.2006.
- [649] Haas, U.: seit 1968 im Betrieb „Gebrüder Haas“ in der Technischen Kontrollorganisation (TKO) tätig. Telefonat am 10.11.2008.
- [650] Horn, N.: European Patent Office. E-Mail am 22.03.2010.
- [651] Jabs, Th.: Mitarbeiter im Museum für Kommunikation. E-Mail am 04.12.2008.
- [652] Konen, J.: Ehemals beim Abnahmedienst der Deutschen Reichsbahn; hat die Lager als Rohling in der Gießerei übernommen, geprüft und zur weiteren Bearbeitung freigegeben. Telefonat am 19.10.2010.
- [653] Labilloy, Fr.: Ingenieur bei INFRABEL, verantwortlich für das Management der Belgischen Eisenbahn Infrastruktur. E-Mail am 03.03.2010.
- [654] Melon, E.: Patentinformationszentrum TU Dresden. E-Mail am 22. 06.2005.
- [655] Mende, V.: Doktorand am Lehrstuhl Eisenbahn- und Straßenwesen. E-Mail am 16.11.2009.
- [656] Muth, W.: von 1960 bis 1997 im Stahlbau Dessau, Konstruktionsbüro. Telefonate am 24.10. und 27.10.2008.
- [657] Quoos, V.: Mitarbeiter der DB Netz AG. Telefonat am 29.01.2007.
- [658] Rogers, S.: Intellectual Property Service. E-Mail am 10.03.2010.
- [659] Sassu, M.: University of Pisa, Department of Structural Engineering. E-Mail am 20.01.2010.
- [660] Schug: Produktmanagement GUMBA-LAST GmbH, Telefonat am 12.10.2009.

Herstellerkataloge, Firmeninterna

- [661] GUMBA: Aktuelle technische Information – Erdbebensicherung mit GUMBA-Elastomer-Lagern. 2/1978.
- [662] Auflager für Hoch- und Tiefbauten der Gutehoffnungshütte Sterkrade AG. Esslingen a.N. (ohne Datum).
- [663] Maschinenfabrik Esslingen (Hrsg.): Brücken. (ohne Datum).
- [664] Maschinenfabrik Esslingen: Gepanzerte Wälz- u. Pendelgelenke, Rollenlager ... (ohne Datum).
- [665] Firmenkataloge und firmeninterne Schriften der Maschinenfabrik Esslingen, (ohne Datum).
- [666] Maschinenfabrik Esslingen (Hrsg.): Esslinger Coroweldlager, (ohne Datum).
- [667] DSD Hilgers Stahlbau GmbH – Vielkugelaufleger, Rheinbrohl, (ohne Datum).
- [668] GHH Sterkrade (Hrsg.): Größtes Neotopf-Brückenlager der Welt, (ohne Datum).
- [669] Stahlwerk Mannheim AG (Hrsg.): Brückenlager, (ohne Datum).

Archive

- [670] Archiv Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung, BTU Cottbus.
- [671] Archiv Lehrstuhl Eisenbahn- und Straßenwesen, BTU Cottbus.
- [672] Archiv Lehrstuhl Stahl- und Holzbau, BTU Cottbus.
- [673] Archiv Lehrstuhl Entwerfen, Verkehrsbauten und Arbeitsstätten, BTU Cottbus.
- [674] Archiv Straßenbauamt Leipzig, Abteilung Konstruktiver Ingenieurbau.
- [675] Archiv Tiefbau- und Vermessungsamt, Konstanz am Bodensee.
- [676] Historisches Archiv MAN Aktiengesellschaft, Augsburg.
- [677] Archiv Maschinenbauanstalt Esslingen, heute im Daimler Konzernarchiv, Stuttgart.
- [678] Archiv Deutsches Museum, München.
- [679] Staatsarchiv Hamburg.

- [680] Landesarchiv Berlin.
- [681] Historisches Archiv, Köln.
- [682] The National Archive, London.
- [683] Archive of the Institution of Civil Engineers, London.
- [684] Municiple Archive, New York.
- [685] Archiv Richard Etlin, New York.
- [686] Archiv Dirk Bühler, München.
- [687] Archiv Klaus Stiglat, Karlsruhe.
- [688] Archiv GMG Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden.
- [689] Archiv Prof. Dr. Lorenz & Co. Bauingenieure GmbH, Berlin.
- [690] Sammlungen der Kunstbibliothek der Staatlichen Museen zu Berlin.

Datenbanken, digitale Archive

- [691] HAER – Historic American Engineering Record Collection, Library of Congress, USA.
- [692] STRUCTURAE – Internationale Galerie und Datenbank des Ingenieurbaus, Deutschland.
- [693] DEPATISnet – Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes.
- [694] ESPACEnet – Datenbank des Europäischen Patentamtes.
- [695] USPTOgov – Datenbank des United States Patent and Trademark Office.

11 Anlagen

11.1 Katalog

Vorbemerkungen

Der Katalog entstand im Verlaufe der Recherche und bildete aus methodischer Sicht eine wesentliche Grundlage für die vorliegende Arbeit. Er diente als „Filter“ bei der Sichtung und Auswertung aller Quellen und stellte die relevanten Informationen vorsortiert, tabellarisch und stichpunktartig zusammen. Die dabei erstellten Teilkataloge nehmen Bezug auf die Gliederung der Arbeit:

Katalog K1 – Versuche zum Berührungsproblem

Katalog K2 – Bemessungsansätze zum Berührungsproblem

Katalog K3 – Versuche zum Reibungsproblem

Katalog K4 – Bemessungsansätze zum Reibungsproblem

Katalog K5 – Versuche zu Ermüdung/Verschleiß

Katalog K6 – Bemessungsansätze zu Ermüdung/Verschleiß

Katalog K7 – Vorschriften-, Normen- und Regelwerk – Brückenbau

Katalog K8 – Vorschriften-, Normen- und Regelwerk – Brückenlager

Katalog K9 – Patente

Die Eintragung der Informationen erfolgte nach vorgegebenen Rubriken, wobei naturgemäß der unterschiedliche Charakter der ausgewerteten Quellen nicht in jedem Fall Informationen zu allen Rubriken ermöglichte. Die ausführliche Nennung der Quellen im Katalog gestattete bei Bedarf einen schnellen Zugriff für eine vertiefende Recherche.

Auf die Ergänzung durch Abbildungen wurde bewusst verzichtet, um den Umfang der Zusammenstellung auf die wesentlichen Informationen einzugrenzen – mit Ausnahme des Kataloges zu den Patenten. Hier war der Zusatz von Abbildungen für das Verständnis der Patentansprüche unerlässlich.

Katalog K1 – Versuche zum Berührungsproblem

K1- 1: 1833 – VICAT

Problem:

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Bruchlast einer Walze – zerdrückt zwischen zwei Ebenen – beträgt den 3.Teil der Bruchlast eines Prismas von der Grundfläche gleich der Durchmesserenebene des Zylinders [57/S.41,56, bezieht sich auf [261/S.214],
Bruchlast von Kugeln – zerdrückt zwischen ebenen Flächen – beträgt den 4.Teil der Widerstandsfähigkeit eines Prismas mit einer Grundfläche gleich dem Inhalte des größten Kugelkreises [59/S.377]

Literatur: [261]Vicat: Recherches Expérimentales sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture ou l'affaissement d'une certaine classe de solides. Annales des Ponts et Chaussées. 1.Serie (1833), S.201-268.

Darüber hinaus in

[59]Köpke, C.: Ueber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 34 (1888), S.374-380.

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgeltenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

K1- 2: 1870 – BALDERMANN

Problem:

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gusseiserne Walze trägt pro Quadratcentimeter Horizontalprojektion 30 bis 50 kg; [117/S.201]

Literatur: [117]Baldermann, O.: Die Eisenbahnbrücke über die Donau bei Maria-Ort. Allgemeine Bauzeitung 38 (1873), S.193-205.

K1- 3: 1878 – WINKLER

Problem: Gesetze der Deformation bilden die Grundlage der Festigkeitslehre, die Verformungen sind jedoch unsichtbar klein [359/S.82]

Zielstellung: Sichtbar machen von Verformungen durch geeignetes Material [359/S.82]

Methode: Versuche mit Kautschuk

Erkenntnis: An Modellen aus Kautschuk und Holz abgeleitet [359/S.95]:

$$b = 3,0 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{d} \cdot \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{E_1} \right)}$$

Mit b = Berührungsbreite, P = Druck, d = Dicke Platte, r = Radius, E = Elastizitätskoeffizienten

Literatur: [359]Winkler, E.: Deformationsversuche mit Kautschuk-Modellen. Civilingenieur 24 (1878), S.81-100.

Darüber hinaus in

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgeltenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

Problem:	Unklare Vorgänge bei der Berührung zweier elastisch-isotroper Körper in einem kleinen Teil ihrer Oberfläche [317/S.155]
Zielstellung:	Beweis seiner theoretischen Aussagen (K1- 4) zur - Größe der Druckfläche - Form und Größe der Druckfigur - Verteilung des senkrechten Druckes - Bestimmung des Maximaldruckes [317/S.156], [318/S.187] - Abhängigkeit von den Elastizitätsmodulen [318/S.189]
Methode:	Versuche mit sprödem Glas [105/S.138], (siehe auch [317/S.168], [92/S.2], [318/S.187]) und Metallen [318/S.190] Glaslinse ($r=28$ mm) gegen beruhte Glasplatte gedrückt, Druckfläche mit Mikroskop und Mikrometerschraube für verschiedene Drücke gemessen, Druckflächen durch Ruß sichtbar gemacht und mikroskopisch gemessen, auch Versuche mit Glaszylindern ($d=7,37$ mm) bei Berührung unter verschiedenen Winkeln [105/S.140] Schwierigkeiten bei Versuchen Metall/Glas [92/S.2], [105/S.140]
Erkenntnis:	Versuche bestätigten seine Theorie, Probleme allerdings bei Versuchen mit Metall, dort zwar prinzipielle Übereinstimmung mit Theorie, als Beweis allerdings zu ungenau Neue – bessere – Definition der „Härte“, damit Grundlage für exakte Härtemessung gegeben [285/S.68f] Versuche standen teilweise im Widerspruch zu seiner Theorie, nach Föppl deutlicher Beweis, dass die Härte von den besonderen Oberflächeneigenschaften abhängt, die die Hertz'sche Theorie nicht berücksichtigt [304/S.443]
Literatur:	[317]Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für reine und angewandte Mathematik 92 (1881), S.155-171. [318]Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes (1882). In: Lenard, Ph.: Schriften vermischten Inhalts von Heinrich Hertz. Vaduz: Sändig, 1988. Darüber hinaus in [57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzlagern. Berlin: Ernst & Sohn, 1919. [105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574. [319]Huber, M.T.: Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. Annalen der Physik 14 (1904), S.153-163. [285]Auerbach, F.: Absolute Härtemessung. Annalen der Physik und Chemie 43 (1891), S.61-100. [304]Föppl, A.: Vorlesungen über Technische Mechanik. Leipzig u. Berlin: Teubner, 1920. [92]Stribeck: Kugellager für beliebige Belastungen. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Heft 2. Berlin: Springer, 1901; auch In: Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 45 (1901), S.73-79, 118-122.

K1- 5: um 1889 – JOHNSON

Problem:	Unstimmigkeiten innerhalb der Grashof-Formel – siehe K2- 11
Zielstellung:	Erhalt verlässlicher Daten als Grundlage weiterer theoretischer Annahmen [51/S.206]
Methode:	Versuche am Kontakt zwischen gehärteten Wagenrädern und Schienen, Aufgebrachte Belastungen zwischen „5000 und 60000 Pounds“ [51/S.206]
Erkenntnis:	Durchschnittliche Spannung (Auflast/Fläche) ist konstant für alle Auflasten, darüber hinaus für die Ausführenden erstaunliche Erkenntnis, das Elastizitätsgrenze für Zug nicht gültig, weil Werkstofffließen durch umschließendes Material behindert [51/S.206] Dadurch sehr viel höhere Elastizitätsgrenze des Materials [51/S.207] Diese Erkenntnis ganz im Gegensatz zu bisherigen Annahmen [51/S.208]
Literatur:	[51]Johnson, J.B.: Relation between total load and maximum stress, when one cylinder rests on another at right angles to it. Transactions of the Society of Civil Engineers 21 (1889), S.203-208.

K1- 6: 1889 – BACH

Problem:	Verteilung der Formänderung auf Walze bzw. Platte im Kontaktbereich [286/S.477], [3/S.199]
Zielstellung:	Veranschaulichung der Verformungen
Methode:	Versuchskörper aus Hartblei
Erkenntnis:	Verformungen der Platten weit kleiner als die der Walze [286/S.477], [3/S.199]; Annahmen von GRASHOF (siehe K2- 11), CULMAN und TETMAJER (siehe K2- 16) ergeben ein um rund 40% zu günstiges Spannungsbild [57/S.45]
Literatur:	[3]Bach, C.: Versuche über die Formänderung der Rollen (Cylinder, Walzen) und Platten von Rollenlagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 38 (1894), S.199. Darüber hinaus in [286]Bach, C.v.: Bücherschau: Die angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre, von L.Tetmajer. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 33 (1889), S.476-478. [56]Keck: Theoretische Untersuchungen – Versuche über die Formänderung der Rollen (Cylinder, Walzen) und Platten von Rollenlagern. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 40 (1894), S.567. [57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

K1- 7: 1889 – BACH

Problem:	Offenbar(!) Mangel an Versuchsergebnissen, um individuelle theoretische Ansätze zu prüfen
Zielstellung:	Prüfung der in [286/S.477] dargestellten Herleitung zur Berechnung der Breite der Berührungsfläche [3/S.199]
Methode:	Versuche mit gusseisernen polierten Zylindern und Platten [3/S.199]
Erkenntnis:	Befriedigende Übereinstimmung [3/S.199]
Literatur:	[3]Bach, C.: Versuche über die Formänderung der Rollen (Cylinder, Walzen) und Platten von Rollenlagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 38 (1894), S.199.

Problem:	Ungenügende Kenntnisse in Bezug auf die „Härte“ als eine der wichtigsten Eigenschaften fester Körper [285/S.61], „Härte“ dabei nichts anderes als eine bestimmte Art von Festigkeit [285/S.97]
Zielstellung:	Ausgehend von der Hertz'schen Definition der „Härte“ Auffindung einer Methode und Entwicklung eines Apparates, um die definierte Härte zu messen [285/S.61]
Methode:	Ausgehend von der Hertz'schen Theorie Versuche an spröden Glaskugeln [285/S.75] (3 Sorten Glas und Quarz [285/S.84]), Druckfläche mittels Mikroskop durch die Glasplatte hindurch beobachtet [285/S.76], mit jedem Material zahlreiche Versuchsreihen unter wachsender Belastung [285/S.86]
Erkenntnis:	<p>Mit ρ = Krümmungsradius in mm, d = Durchmesser der Druckfläche in mm und mit D als Grenzwert beim Eintritt bleibender Deformation p = Druck in kg, P = Grenzwert von p beim Eintritt bleibender Deformation p_1 = max. Spannung im Mittelpunkt der Druckfläche, P_1 = dessen Grenzwert („theoretische Härte“ gegenüber H = „wahre Härte“)</p> <p>1. $q = \frac{P}{d^3} = konst.$ [285/S.86], 2. $\rho \cdot q = konst.$ [285/S.88]</p> <p>3. $\frac{P}{D^2} \neq konst., sondern \frac{P}{D^{\frac{3}{2}}} = konst.; \frac{P}{\rho^2} \neq konst., sondern \frac{P}{\rho} = konst.$</p> <p>$\frac{D}{\rho} \neq konst., sondern \frac{D^{\frac{3}{2}}}{\rho} = konst.$ [285/S.74,90]</p> <p>4. $P_1 = \frac{6}{\pi} \cdot \sqrt[3]{P \cdot q^2} \neq konst.,$ sondern stark vom Krümmungsradius abhängig, Korrektur für „Hertz'sche Härte“ : $\sqrt[3]{\rho}$, [285/S.74,91,93,95]; [306 /S.219ff]</p> <p>also $P_1 = \frac{6}{\pi} \cdot \sqrt[3]{P \cdot q^2} \cdot \sqrt[3]{\rho} = H = \frac{6}{\pi} \cdot \sqrt[3]{P \cdot \rho \cdot q^2}$</p> <p>5. erster Sprung immer in der Platte, nicht in der Linse [285/S.94] Insgesamt: Theorie von Hertz nicht in allen Punkten bestätigt [92/S.2]</p>
Literatur:	<p>[285]Auerbach, F.: Absolute Härtemessung. Annalen der Physik und Chemie 43 (1891), S.61-100.</p> <p>Darüber hinaus in</p> <p>[306] Föppl, L.: Der Spannungszustand und die Anstrengung des Werkstoffes bei der Berührung zweier Körper. In: Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 7 (1936), S.209-221.</p> <p>[9]Berndt, G.: Über die Gültigkeit der Hertz'schen Formeln zur Berechnung der Abplattung von Meßkörpern. Zeitschrift für technische Physik 3 (1922), S.14-21, 82-87.</p> <p>[301]Föppl, A.: Ueber die mechanische Härte der Metalle, besonders des Stahls. Annalen der Physik. 3.Folge. 63 (1897), S.103-108.</p> <p>Ergänzend in [92]</p>

K1- 9: 1893 – MARSTON

Problem:	Spannungsverteilung innerhalb der Rollen und Platten unklar [17/S.105]
Zielstellung:	(A) Erhalt wertvoller Informationen zur Spannungsverteilung im Kontaktbereich [17/S.105] (B) Vergleich eigener theoretischer Ansätze zur Spannungs- und Verformungsberechnung durch Spannungsoptik [17/S.110,114]
Methode:	Gebrauch der Spannungsoptik an optischem Glas [17/S.105]
Erkenntnis:	(A) Spannungstrajektorien innerhalb der Walzen entsprechen Kreisbögen [17/S.109], [17/S.118]; Spannungsoptik zur Überprüfung theoretischer Ansätze geeignet [17/S.110] (B) Eigener theoretischer Ansatz aus [17] ist „strictly correct“ für Abtrag einer Linienlast [17/S.121] – nahe der Mitte des Kontaktbereiches – nicht im Kontaktbereich und an den Rändern
Literatur:	[17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.

K1- 10: 1893 – CRANDALL; MARSTON

Problem:	Erkenntnisse an Glas sind nicht zwangsläufig auch zutreffend an den weicheren Metallen;
Zielstellung:	(A) Offenbar Versuch, Spannungstrajektorien wie jene in Glas auch an Metall sichtbar zu machen; (B) Abgleich eines eigenen theoretischen Berechnungsansatzes für Verformungen und Spannungen [17/S.118]
Methode:	In schwerer Testmaschine Walzen und Platten aus Werkzeugstahl abgedrückt [17/S.118] Fließlinien an der polierten Oberfläche durch Licht sichtbar gemacht [17/S.118]
Erkenntnis:	(A) Bestätigung der Spannungslinien ermittelt an optischem Glas [17/S.119] (B) keine konkrete Aussage [Anm.d.Verf.] Unter hohem Druck starke Abplattungen und Eindrücken von Walze in Platte, schließlich Aufspaltung der Platte durch die Rolle [17/S.119]
Literatur:	[17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.

K1- 11: 1893 – McKIM; MARSTON

Problem:	Die in Amerika bekannte modifizierte Grashof-Formel macht die Bruchlast einer Walze abhängig von der Dicke der Platten [17/S.119,120]
Zielstellung:	Bestimmung der Bruchlast verschieden großer stählerner Walzen jeweils mit unterschiedlich dicken Platten [17/S.120] (B) Messung der Größe der Kontaktfläche
Methode:	(A) Durchmesser der Rollen 1,2,3 und 4 inch mit Platten unterschiedlicher Dicke (B) mit verschiedenen Methoden - mit Blaupapier - mit Talkschiere (coating of tallow) [17/S.122], aber Probleme beim Messen [17/S.123]
Erkenntnis:	Bruchlast von der Dicke der Lagerplatten unabhängig [17/S.120]
Literatur:	[17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.

K1- 12: 1893 – DESLANDRES

- Problem:** Ungenügende Kenntnis über die zulässige Belastung von Lagerwalzen, Formel von Galliot (vgl. K2- 18) nicht anwendbar, da Ergebnis mit deutlichen Abweichungen von den Erfahrungen in der Praxis [19/S.1160],
- Zielstellung:** Ermittlung einer „sicheren“ Belastung bei begrenzter Formänderung [19/S.1174], [20/S.238]
- Methode:** Mit Rollen aus Gusseisen (d= 12, 16 cm) und Stahlguss (cast steel, 12 cm), Platten alle aus Gusseisen [20/S.238],
Rollen und Platten mit l = 20 cm, Plattendicke 8 cm [105/S.572],
Oberfläche von Rollen und Platten unterteilt und markiert,
weder Druckflächen noch elastische Formänderungen gemessen, sondern nur bleibende Änderungen des Radius'; bis zu einem bestimmten „kritischen Druck“, Formänderungen ungefähr proportional zum anwachsenden Druck, jedoch nicht über 1/30000 des Radius' [105/S.572],
- Erkenntnis:** Bis 44 kg/cm² der Fläche 2rl betrug Formänderung der Walze nur 1:30 000 des Radius – als Grenzlaster interpretiert [20/S.238],
Empfohlene Spannung 50 % davon, also ca. 22 kg/cm² - für Gusseisenrolle, wenn Stahlgussrolle 1/5 weniger – also 18 kg/cm² [20/S.238], [19/S.1174]; Erfahrungsformel zur Tragfähigkeit von Walzen [57/S.56];
- Literatur:** [19]Deslandres, M.H.: Expériences sur la Résistance des Rouleaux Métalliques. Annales des Ponts et Chaussées. 7.Serie (1893), S.1160-1174.
[20]Deslandres, H.: Versuche über die zulässige Belastung der Walzen für Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins 40 (1894), S.238.
Darüber hinaus in
[17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277..
[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.
[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.
-

K1- 13: 1894 – MARSTON

- Problem:** Kaum versuchstechnisch ermittelte Bruchlasten von Lagerwalzen, und wenn, dann jedoch in zu geringem Umfang bezgl. verschiedener Walzendurchmesser [17/S.124]
- Zielstellung:** Bestimmung des Einflusses des Walzendurchmessers auf die Fließspannung und Bruchlast [17/S.123,124]
(B) Ableitung eines empirischen Faktors für Marston Theorie (vgl.K2- 19)
- Methode:** Rollendurchmesser von 1...16 inch, Platten 0,9 Inch dick [17/S.125]
Fließspannung schwer zu bestimmen, weil erstes Fließen für das Auge unsichtbar, nur durch Licht sichtbar (siehe K1- 10), deswegen Last schrittweise erhöht, um Platten und Rollen zwi-schendurch sorgfältig prüfen zu können
- Erkenntnis:** Fließspannung unabhängig vom Walzendurchmesser [17/S.124]
(B) Formel nach Marston (vgl. K2- 19) bestätigt,
Strenge Empfehlung zum Ändern der „Bridge Specifications“ [17/S.126]
- Literatur:** [17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.
-

K1- 14: um 1895 – JUSELIUS

Problem:	Unstimmigkeiten zwischen den theoretischen Ansätzen von TETMAJER (siehe K2- 16) und den Versuchen von BACH mit Hartblei (siehe K1- 6), [57/S.45]
Zielstellung:	Abhängigkeit der Dicke der Platten auf die Formänderung [57/S.58], Ausdehnung der Versuche BACHs auf Schweißseisen [57/S.45], später auch auf Grauguss-Gusseisen, überschmiedetes Flusseisen und auf Formstahlguss
Methode:	Versuche an Walzen (d= 10cm, l= 12 cm) zwischen 2 Lagerplatten von 4,0 bzw. 8,0 cm Stärke, Ausrichtung der Stirnflächen von Walze und Platten, schleifen und polieren dieser sowie Aufbringen eines horizontalen und vertikalen Rasters, in Presse stoßfreie Belastung bis 120 t, Messung der Formänderungen mittels Kathetometer [350/S.274], [57/S.58]
Erkenntnis:	BACHs Ergebnisse an Hartblei für Schweißseisen nicht bestätigt [350/S.271], dafür sehr gute Übereinstimmung mit den Annahmen CULMANNs [57/S.45], danach in der Mitte der Berührungsfäche Verteilung der Zusammendrückung jeweils zu 50% auf Walze und Platte [350/S.273]
Literatur:	[350]Tetmajer, L.v.: Elastizitäts- und Festigkeitslehre. Leipzig: Deuticke, 1905. Darüber hinaus in [57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

K1- 15: 1899 - STRIBECK

Problem:	Unstimmigkeiten zwischen Theorie und Versuch bzgl. der Belastung an der Elastizitätsgrenze [92/S.3], kaum Erfahrungen über die zulässige Belastung der Kugeln von Kugellagern [92/S.1]
Zielstellung:	(A) Klarheit über die Spannung bei Erreichen der Proportionalitätsgrenze (B) Ermittlung zulässiger Belastungen der Kugeln von Kugellagern des Maschinenbaus
Methode:	Versuche an gehärteten Gussstahlkugeln [92/S.4] kleinen Durchmessers (3/8 bis 9/8" engl. Maß) [92/S.7] Messung der Annäherung und nicht der Druckflächen [92/S.4]
Erkenntnis:	Bereits bei kleinster Belastung Elastizitätsgrenze überschritten [92/S.10], Belastungen bei Eintritt der Elastizitätsgrenze proportional den Quadraten der Durchmesser, somit Spannungen für beliebige Kugeldurchmesser gleich groß [92/S.17], die gleiche verhältnismäßig bleibende Stauchung ϵ tritt stets bei derselben Flächenpressung – unabhängig vom Durchmesser – auf [9/S.19] (B) zulässige Belastungen nach $P = k \cdot D^2$, siehe [92/S.32], [88/S.336]
Literatur:	[92]Stribeck: Kugellager für beliebige Belastungen. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Heft 2. Berlin: Springer, 1901; auch In: Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 45 (1901), S.73-79, 118-122. [88]Schwinning: Versuche über die zulässige Belastung von Kugeln und Kugellagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 45 (1901), S.332-336. Darüber hinaus in [9]Berndt, G.: Über die Gültigkeit der Hertzschen Formeln zur Berechnung der Abplattung von Meßkörpern. Zeitschrift für technische Physik 3 (1922), S.14-21, 82-87.

K1- 16: 1899 – RASCH

Problem: Zielstellung: Untersuchung von Gussstahlkugeln bezüglich (A) Präzision in der Fertigung; (B) Festigkeitseigenschaften

Methode: Versuche an zahlreichen Gussstahlkugeln verschiedenen Durchmessers ($r=0,152$ bis $0,476$ cm), verschiedener Herkunft und Härte [79/S.2]

Erkenntnis: (A) hohe Genauigkeit in der Fertigung und Prüfung möglich [78/S.301]
(B) bereits bei kleinen Belastungen bleibende Verformungen [78/S.301]
Kritik an den Hertz'schen Formeln bzgl. deren Anwendung für die Spannungsberechnung [78/S.320], [79/S.2]; beginnende Zerstörung der Kugeln bei nahezu gleicher Spannung unabhängig vom Kugeldurchmesser [78/S.319]; Formänderungen wachsen erheblich rascher – die Flächenpressung erheblich langsamer, als die Hertz'schen Gleichungen vermeinen [79/S.2]

Literatur: [78]Rasch, E.: Prüfung von Gussstahlkugeln. Zeitschrift für Werkzeugmaschinen und Werkzeuge (1899), S.301-303, 319-320.
[79]Rasch, E.: Über die Berechnung der an Kugel- und Rollenlagern auftretenden Materialspannungen. Eisenbau 6 (1915), S.1-8.
[9]Berndt, G.: Über die Gültigkeit der Hertz'schen Formeln zur Berechnung der Abplattung von Meßkörpern. Zeitschrift für technische Physik 3 (1922), S.14-21, 82-87.

K1- 17: 1901 – LAFAY

Problem: Messtechnische Probleme bei Versuchsdurchführungen [326/S.241]

Zielstellung: Messung der Annäherung von Körpern bei der Berührung von Kugelflächen und Ebenen bei Belastungen innerhalb der Elastizitätsgrenze [13/S.6]

Methode: Drücke von nur $0,1 \dots 3,5$ kg für Kugeln mit $d = 10 \dots 500$ mm, Messung mittels Interferenzanordnung (Newtonsche Ringe) [13/S.6]

Erkenntnis: Hertz'sche Formeln auch innerhalb der Proportionalitätsgrenze ungültig (aber wahrscheinlich systematischer Fehler) [13/S.6], [9/S.20,85]; Abplattung der Berührungszone mit der für technische Messungen genügenden Genauigkeit nach Hertz berechenbar [9/S.21]

Literatur: [326]Lafay, M.A.: Recherches Expérimentales sur les Déformations de Contact des Corps élastiques. Annales de Chimie et de Physique 23 (1901), S.241-288.
[13]Bochmann, H.: Die Abplattung von Stahlkugeln und Zylindern durch den Meßdruck. Diss. an der TH Dresden, 1927.
[9]Berndt, G.: Über die Gültigkeit der Hertz'schen Formeln zur Berechnung der Abplattung von Meßkörpern. Zeitschrift für technische Physik 3 (1922), S.14-21, 82-87.

K1- 18: 1901/07 – Verein Deutscher Ingenieure

Problem: Offenbar mangelnde Erkenntnisse bezüglich der Wechselwirkung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Zielstellung: Ermittlung der (A) Festigkeit und (B) Beweglichkeit von Rollen- und Kipplagern [90/S.3]

Methode: Versuche an Rollen aus Thomaseisen ($d = 3 \dots 15$ cm, $l = 15 \dots 75$ cm) zwischen ebenen Platten, um Lasten in Abhängigkeit der Beweglichkeit zu gewinnen [90/S.3]
Dabei bei mehrmaligen Hin- und Herbewegungen großer Verschiebungsweg gewählt; Verschiebungswiderstände mehrmals gemessen;
Einfluss des Hobelstrichs (quer oder längs zur Laufrichtung) geprüft; bei einigen Versuchen Einfluss von Verunreinigungen geplant, jedoch aus Zeitmangel nicht ausgeführt; Versuche auch bei Belastungen jenseits des Auftretens von Fließerscheinungen [90/S.7]

Erkenntnis: (A) Bei Drei- bis Vierfachem der praxisüblichen Belastung zwar schon bei geringer Last Plastizierungen, jedoch keine Anzeichen auf eine Gefährdung der Sicherheit der Lager [90/S.58]
(B) hier Verweis auf Katalognummer der Reibungsversuche

Literatur: [90]Stamer: Versuche mit Rollenlagern. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Berlin: Selbstverlag, 1915.

K1- 19: 1912 – Kgl. Materialprüfanstalt (RASCH)

Problem:

Zielstellung:

Methode: Versuche an gehärteten Gussstahlkugeln mit bis zu 4" (engl.) = 101,6 mm Durchmesser [79/S.3], Auflast bis 5000 kg, Berührungsfläche mittels Zeiß'schen Komparators gemessen [79/S.4]

Erkenntnis: Vorzügliche Übereinstimmung der Theorie von Rasch (vgl.K2- 25) mit diesen und seinen älteren Versuchen (K1- 16),
Bestätigung des Ergebnisses früherer Versuche, wonach der Bruch der Berührungskörper bei immer derselben Flächenpressung ($85t/cm^2$) eintritt [79/S.5], Fehler der Hertz'schen Gleichung nimmt mit zunehmendem Kugelradius ab [79/Tab.2]

Literatur: [79]Rasch, E.: Über die Berechnung der an Kugel- und Rollenlagern auftretenden Materialspannungen. Eisenbau 6 (1915), S.1-8.

K1- 20: 1920 – WHITTEMORE; PETRENKO

Problem: Vom Maschinenbau abweichende Verhältnisse bei Lagern an schweren Waffen, an Waffen unregelmäßige langsame Bewegung bei sehr großem Impact, wenn Kanone zum Beispiel abfeuert [106/S.4], Untersuchungen im Auftrag der Navy

Zielstellung: Ermittlung zulässiger Belastung (maximum safe load) und der Anfangsreibung (static friction) von Kugel- und Rollenlagern [106/S.3]

Methode: Versuche an Kugeln mit 1,0 bis 1,5 inchs und Rollen mit 1,25 inchs Durchmesser zwischen flachen und zylindrischen Platten, Messung der Verformungen und Vergleich mit Hertz'scher Theorie und Angaben nach Stribeck [106/S.3], Belastungen von 500 bis 4000 amerik. Pfund (227 bis 1815 kg) [13/S.7]

Erkenntnis: Ungefähre Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit Hertz,
Verhältnis Reibung zu Last bis zu einer vom Durchmesser abhängigen „kritischen“ Last praktisch konstant, diese kritische Belastung mit nachfolgender überproportionaler Zunahme der Reibung war in allen Fällen kleiner als die als „sichere Belastung“ von Stribeck (vgl. K1- 15) angegebene Last [106/S.3]

Literatur: [106]Whittemore, H.L.; Petrenko, S.N.: Friction and carrying capacity of ball and roller bearings. In: Department of Commerce (Hrsg.): Technologic Papers of the Bureau of Standards, No. 201, Washington, 1921.

Darüber hinaus in

[13]Bochmann, H.: Die Abplattung von Stahlkugeln und Zylindern durch den Meßdruck. Diss. an der TH Dresden, 1927.

K1- 21: 1921-1923 – DUMAS

Problem: Noch immer sehr unterschiedliche Berechnungsansätze für Walzendurchmesser im Gebrauch, die wiederum zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen – somit insgesamt sehr unzuverlässige und u.U. unwirtschaftliche Dimensionierung; Unstimmigkeiten als Ergebnis von Versuchen zur Gültigkeit der Hertz'schen Gleichungen [25/S.1]

Zielstellung: (A) Grenzlast ohne bleibende Verformungen [24/S.148],

(B) Größe des Rollwiderstandes [25/S.1]

Methode: (A) Versuche mit 5" = 12,7 cm großen gehärteten Gussstahlkugeln gegen Platten aus verschiedenem Material, von Bauwerkflusseisen bis ölgehärtetem Stahl, Belastungen von 50 bis 5000 kg [128/S.562]

(B) Entwicklung eines Waagenpendels, dann Messung des Dämpfungswinkels, Versuche an Kugeln von 0,1...5,0 cm Durchmesser mit 4...20 kg belastet [25/S.4,5]

Erkenntnis: Bei kleinen Belastungen gute Übereinstimmung der Hertz'schen Gleichungen mit den Versuchsergebnissen [128/S.562], [25/S.1]

(A) Grenzlast der Kugel $\frac{P}{d^2} = 10^{-6} \cdot 0,12 \cdot H^3$ sowie die Grenzlast des Zylinders

$$\frac{P}{d \cdot l} = \frac{1}{300} \cdot H^2 \text{ Brinellhärte } H \text{ in [kg/mm}^2\text{], sonst in [cm] und [kg]; [25/S.6]}$$

$$p_0^{\text{zul}} = \frac{1}{3} \cdot H_B; \text{ als zulässige Belastung für den Fall „Zylinder“ [128/S.563]}$$

(B) Hebelarm des Rollwiderstandes von

$$\text{Kugel auf Ebene: } f = 10^{-5} \cdot 8 \cdot \left(\frac{P}{d^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d$$

$$\text{Zylinder auf Ebene: } f = 10^{-5} \cdot 8 \cdot \left(\frac{P}{l \cdot d}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot d$$

Der Rollwiderstand M folgt aus der Auflast und dem Hebelarm zu $M = P \cdot f$;

Jeweils alle Längen in [cm] und Kräfte in [kg]; [25/S.6]

Literatur: [24]Dumas, A.; Ros, M.: Sur la charge limite admissible de rouleaux en contact avec des chemins. Bulletin technique de la Suisse romande 50 (1924), S.148-152.

[25]Dumas, A.: Les Résistance au Roulement de Sphères et de Cylindres sur des Plans. In: Tagungsband zum Internationalen Kongress für Brückenbau und Hochbau, Zürich, 1926.

[128]Bleich, Fr.: Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin: Springer, 1924.

[531]Kulka: Die Streckgrenze als Berechnungsgrundlage für den Konstrukteur. Stahlbau 1 (1928), S.6-9.

K1- 22: 1927 – BOCHMANN

Problem: Bei bisherigen Versuchen mit hohen Belastungen gearbeitet, die die Proportionalitätsgrenze übersteigen; weil dabei Theorie von Hertz ungültig, sind diese Versuche für die Messtechnik unbedeutend [13/S.6]

Zielstellung: Herstellen einer Beziehung zwischen der Abplattung, der Belastung, den Zylinderabmessungen und der Größe der Messfläche für Belastungen innerhalb(!) der Elastizitätsgrenze [13/S.6]

Methode: Messung der Abplattung mittels Zeiß'schen Optimeters [13/S.6]

Erkenntnis: Abplattung M von Zylindern zwischen zwei Ebenen

$$M = 0,923 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{P}{L} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{D}} \text{ in mm [13/S.25]}$$

Mit D = Zylinderdurchmesser in mm, P = Belastung in kg, L = Kontaktlänge in mm

Hertz'sche Formel zur Berechnung der Abplattung ungültig, korrigierte Abplattungen für die wichtigsten Berührungsfälle angegeben [13/S.27]

Literatur: [13]Bochmann, H.: Die Abplattung von Stahlkugeln und Zylindern durch den Meßdruck. Diss. an der TH Dresden, 1927.

K1- 23: 1929/32 – THUM; WUNDERLICH

(A.d.Verf.: kein direkter Versuch zum Kontaktproblem, das Problem ist jedoch für die Beschreibung der Vorgänge im Kontaktbereich relevant)

Problem:	Fließgrenze kein eindeutig festgelegter Wert, sondern bei ein und demselben Werkstoff von der Beanspruchungsart abhängig [573/S.261]
Zielstellung:	Aufschluss über die Fließgrenze bei mehraxialer Spannung [573/S.262]
Methode:	Beobachtung der Wechselwirkung Spannung/Fließgrenze beim Biegeversuch, wegen der geradlinig anwachsenden Spannungsverteilung [573/S.262], ergänzt durch Verdrehungsversuch Untersuchung von Flach- und Rundstäben [573/S.270]
Erkenntnis:	Anschauungen bis dato über die Streckgrenze bei ungleichmäßiger Spannungsverteilung ungültig. Die Ursache dafür liegt offenbar im Bestreben des Werkstoffs begründet, in Schichten bzw. paketweise oder „quantenhaft“ zu fließen, [573/S.270]; Bei Behinderung der Formänderung z.T. deutliche Erhöhung der Fließgrenze [573/S.270], [338/S.95], Zum Beispiel setzt beim Biegeversuch das Fließen bei einer wesentlich höheren Spannung ein, als bei der gleichmäßigen Belastung eines Stabes auf Zug [306/S.219].
Literatur:	[573]Thum, A.; Wunderlich, F.: Die Fließgrenze bei behinderter Formänderung. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 3 (1932), S.261-270. Darüber hinaus in [338]Prager, W.: Die Fließgrenze bei behinderter Formänderung. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 4 (1933), S.95-97. [306] Föppl, L.: Der Spannungszustand und die Anstrengung des Werkstoffes bei der Berührung zweier Körper. In: Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 7 (1936), S.209-221.

K1- 24: 1936 – FÖPPL

Problem:	Bereits viele Untersuchungen zu den Spannungen im Kontaktbereich vorhanden, i.d.R dabei jedoch Spannungen im Inneren der Körper in Nachbarschaft zum Kontaktbereich vernachlässigt [306/S.209]
Zielstellung:	Aufschluss über die Anstrengung des Werkstoffs im Inneren der sich berührenden Körper [306/S.209]
Methode:	Theoretisches Modell mittels „Unendlicher Halbraum“ [306/S.211] Versuch zur Bestätigung durch Druckversuch mit Walze ($r = 60\text{mm}$) aus St60 auf Platte aus St37; Platte jeweils angerußt, um Druckfläche sichtbar zu machen [306/S.216] Nach Druckversuch Platte aufgeschnitten und Fließlinien mit Ätzmittel sichtbar gemacht [306/S.217]
Erkenntnis:	Stärkste Beanspruchung im Innern auf der Symmetrieachse im Abstand $0,78a$ von der Oberfläche entfernt; [306/S.212]; Theorie durch Versuche bestätigt; [306/S.217,221] Entgegen der bisher üblichen Annahme erfolgt die Zerstörung von Walzen von Innen heraus [306/S.219,220]
Literatur:	[306] Föppl, L.: Der Spannungszustand und die Anstrengung des Werkstoffes bei der Berührung zweier Körper. In: Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 7 (1936), S.209-221.

K1- 25: 1943 – SKF

Problem:	Kugellager haben unter Umständen in manchen Betriebszuständen – z.B. im Stillstand – hohe Belastungen aufzunehmen. Dann Begrenzung bleibender Verformungen wichtig [102/S.1], (Versuche 1943 veröffentlicht [102/S.11], A.d.Verf.)
Zielstellung:	(A) Versuche zur Bestimmung der statischen Tragzahl (gibt die für einen Durchschnittsfall ermittelte statisch zulässige Lagerbelastung an, bei der die auftretende gesamte bleibende Verformung an der Berührungsstelle die Größe von 0,0001 des Rollkörperdurchmessers erreicht) [102/S.1,2] (B) Bestimmung eines Berichtigungswertes zu (A) in Abhängigkeit von der Härte [102/S.11],
Methode:	Test von Rollkörpern mit verschieden geformten Berührungskörpern (Anwendungsfall Maschinenbau), bei wiederholter Belastung Messung von bleibender Verformung, Ableitung einer empirischen Formel aus den Versuchsergebnissen [102/S.6]
Erkenntnis:	(A) Bei harten Werkstoffen bleibende Verformung bereits bei kleinen Belastungen [102/S.9], (B) Belastung zum Erreichen einer gewissen Eindrucktiefe steigt mit zunehmender Härte, bei Anfangsverformungen allerdings umgekehrt, (siehe (A)) [102 /S.13], spezifische Rollkörperbelastung konvergiert, insbesondere bei Berührung Rolle/Ebene, Abhängigkeit der spezifischen Rollkörperbelastung von der Härte des weicheren Körpers aufgezeigt [102/S.13ff], Berichtigungsfaktor für Berührung Rolle/Ebene angegeben [102/S.15]
Literatur:	[102]Vereinigte Kugellagerfabriken Aktiengesellschaft Schweinfurt (Hrsg.): Statische Tragfähigkeit von Wälzlagern und ihre Abhängigkeit von der Härte. In: Wälzlagertechnische Mitteilung Nr.3 (1950), S.1-16.

K1- 26: 1967 – HAKENJOS

Problem:	Ungenügende Kenntnis des Zusammenhangs zwischen statischer Belastung und Rollreibung [47/S.58]
Zielstellung:	Bestimmung des Übergangs vom elastischen in den plastischen Bereich [47/S.56],
Methode:	Belastungen bis 600 Mp, mit Messuhren Verformungen in Abhängigkeit von der Auflast gemessen [47/S.55]
Erkenntnis:	Bereits bei kleinen Belastungen örtliche Plastizierungen Zusammenhang zwischen bleibender Verformung und Auflast nach Potenzfunktion festgestellt, mit unterschiedlicher Steigung entsprechend der verwendeten Werkstoffe, Bestimmung der Grenzlast für erste bleibende Formänderungen [47/S.67]
Literatur:	[47]Hakenjos, V.: Untersuchungen über die Rollreibung bei Stahl im elastisch-plastischen Zustand. Diss. TH Stuttgart, 1967.

Katalog K2 – Bemessungsansätze zum Berührungsproblem

K2- 1: 1859 – WERDER

Problem:

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: „Der Druck per Längeneinheit wurde proportional dem Radius r gesetzt und für die gußeisernen Stelzen zu $12 r$ Kgr. per lfd. Centimeter genommen, wenn r in Centimeter gegeben ist; [...]“ [155 /S.15]

Literatur: [155]Gerber, H.: Das Pauli'sche Trägersystem und seine Anwendung. Nürnberg: Campe & Sohn, 1859.

K2- 2: 1861 – SCHWEDLER

Problem:

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: „Druck einer ebenen Gußeisenfläche auf Gußeisenrolle kann pro Zoll Durchmesser und Länge 1 Ctr. betragen, ohne dass die Elastizitätsgrenze überschritten wird“ [248/S.600], [131/S.285]

Literatur: [248]Schwedler, W.: Der eiserne Überbau der Brahe-Brücke bei Czersk, in der Bromberg-Thorner Eisenbahn. Zeitschrift für Bauwesen 11 (1861), S.579-602.
[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.
[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.
[131]Brandt, E.: Lehrbuch der Eisen-Constructionen. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1876.

K2- 3: 1867 – WINKLER

Zielstellung:

Methode: Mathematische Herleitung für den allgemeinen Fall der Berührung zweier Körper mit gekrümmter Oberfläche, daraus Ableitung für den Anwendungsfall der Berührung Walze/Ebene

Ergebnis: $P = C \cdot l \cdot \sqrt{r}$ für die Berührung Walze/Ebene mit
 $C =$ Materialkonstante [nicht definiert, A.d.Verf.]
 $l =$ Länge der Walze; $r =$ Radius der Walze

Literatur: [358]Winkler, E.: Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit. Prag: Dominicus, 1867.

K2- 4: 1869 – KOEPKE

Zielstellung: Ableitung einfacher Ausdrücke für die Formänderungen von Körpern mit gekrümmten Oberflächen als Hilfestellung zur Schätzung der Dimensionen für den praktischen Anwendungsfall ./S.61]

Methode: Vernachlässigung der Querdehnung
[58/S.6], Ansatz des Hooke'schen Gesetzes [57/S.42]

Ergebnis: $P = 1,89 \cdot r \cdot E \cdot \sqrt{\delta^3}$
 $\delta =$ Verkürzung der mittleren Körperfaser – nicht definiert, später jedoch ergänzt [57/S.42]
 $E =$ Elastizitätsmodul, $r =$ Radius der Walze

Literatur: [58]Köpke: Ueber die Kompression von Körpern mit gekrümmten Oberflächen. Deutsche Bauzeitung 3 (1869), S.61-62.
[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

K2- 5: 1869 – FRÄNKEL

Zielstellung:

Methode: Annahme, daß gusseiserne Walze pro Quadratcentimeter Horizontalprojektion 20 bis 24 kg trägt (Gussstahl das ca. 1½ -fache); in Verbindung mit Winklers theoretischem Ansatz (siehe K2- 3] schlußfolgert FRÄNKEL, daß „[...] eine gußeiserne Walze von 15 cm Durchmesser und 50 cm Länge einen Druck von etwa 20·15·50 = 15000 kg erhalten könne.“ [149/S.196]

Ergebnis: für Gusseisen: $n \cdot l \cdot r = 21 \dots 25 \cdot A$; für Gussstahl: $n \cdot l \cdot r = 14 \dots 16,5 \cdot A$ [57/S.46], [105/S.134]

Literatur: [149]Fraenkel, W.: Construction eiserner Fachwerkträgerbrücken. Civilingenieur 15 (1869), S.177-198,Taf.14.

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.

K2- 6: 1874 – STÉVART

Zielstellung:

Methode: Annahmen wie Winkler in [57/S.42], [105/S.131]

Ergebnis:

$$p_1 = \sqrt[3]{\frac{9}{32} \cdot \frac{P^2}{R \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right)}}$$

Mit p_1 = stärkste Druck in der Berührungsfläche; R = Radius der Walze, P = einwirkende Kraft ; α, β = Erfahrungskoeffizienten – ohne Angabe [54/S.292f]

Literatur: [91]Stévert, A.: Note sur les Dépressions que subissent deux Corps en Contact. Revue universelle des mines 36 (1874), S.148-160.

[54]Keck: Theoretische Untersuchungen – Ueber die Zusammendrückung zweier sich berührender elastischer Körper. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 21 (1875), S.291-294.

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.

K2- 7: 1874 – KÜBLER

Zielstellung:

Methode: Ansatz Hooke'sches Gesetzes, Nur für Spannungen unterhalb der Elastizitätsgrenze [60/S.236]

Ergebnis:

$$\frac{1}{r} < \frac{32}{9} \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \cdot \frac{k^3 \cdot l^2}{P^2} \text{ mit}$$

r, l = Radius, Länge; E = E-Modul; k = max. Pressung; P = äußere Krafteinwirkung, [60/S.236f]

Literatur: [60]Kübler, J.: Bestimmung der Größe der Rollen oder Pendel in den Rollenauflegern der Brücken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 18 (1874), S.235-237; mit Berichtigung [8].

[8]Bäuerle, A.: Zur Bestimmung der Größe der Rollen oder Pendel in den Rollenauflegern der Brücken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 19 (1875), S.161-162.

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.

[54]Keck: Theoretische Untersuchungen – Ueber die Zusammendrückung zweier sich berührender elastischer Körper. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 21 (1875), S.291-294.

K2- 8: 1875 – BÄUERLE

Problem: Fehler in Formel von KÜBLER (siehe K2- 7)

Zielstellung:

Methode: Korrektur von KÜBLER und Erweiterung auf Einfluß der Dicke der Unterlagsplatte [57/S.44]

Ergebnis:

$$r = \frac{E_1}{E_2} \cdot \left[-\frac{d}{2} + \sqrt{\left(\frac{9 \cdot P^2 \cdot E_2^2}{32 \cdot l^2 \cdot k^3 \cdot E_1} + \frac{d^2}{4} \right)} \right] \text{ mit}$$

r, l = Radius von Walze oder Stelze, Länge; P = zu übertragender Druck; d = Dicke Unterlagsplatte
 E = Elastizitätsmoduli von Walze(1)/Platte(2); k = größte zulässige Inanspruchnahme [8/S.161f]
 für $E_1 = E_2$ folgt nach [57/S.44]

$$r = -\frac{d}{2} + \sqrt{\frac{9 \cdot P^2 \cdot E}{32 \cdot k^3} + \frac{d^2}{4}}$$

Literatur: [8]Bäuerle, A.: Zur Bestimmung der Größe der Rollen oder Pendel in den Rollenauflagern der Brücken. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 19 (1875), S.161-162.

Darüber hinaus in

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

K2- 9: 1875 – WINKLER

Zielstellung: Ohne Angabe [A.d.Verf.]

Methode: Mathematische Herleitung unter der Annahme, dass gleichmäßiges Einpressen von Walze und Platte [108/S.274] und dass die elastischen Eindrückungen an den Berührungstellen proportional den sie erzeugenden Normaldrücken sind [105/S.131], [57/S.42]

Ergebnis:

$$n = \frac{3 \cdot D}{4 \cdot l \cdot \sqrt{(A + A_1) \cdot K^3 \cdot d}} \text{ oder } K = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot D^2}{16 \cdot n^2 \cdot l^2 \cdot d \cdot (A + A_1)}} \text{ mit}$$

K = zulässiger Druck pro Fläche; D = Gesamtdruck auf sämtliche Walzen; n, d, l = Anzahl, Durchmesser, Länge der Walzen; A, A_1 = Materialkonstanten – ungewiss, da Mangel an Versuchen, abgeleitet aus Erfahrungen an gebauten Brücken, daraus folgt:

für Gusseisen: $n \cdot l \cdot d = 2000 \dots 3900 \cdot D$

für Stahl: $n \cdot l \cdot d = 1600 \dots 3100 \cdot D$ [108/S.277]

für Schweißisen: $n \cdot l \cdot d = 2000 \dots 3900 \cdot D$ [105/S.134]

Literatur: [108]Winkler, E.: Die Gitterträger und Lager gerader Träger. 2.Aufl. Wien: Carl Gerold's Sohn, 1875.

Darüber hinaus in

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.

[54]Keck: Theoretische Untersuchungen – Ueber die Zusammendrückung zweier sich berührender elastischer Körper. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover 21 (1875), S.291-294.

K2- 10: 1876 – BAENTSCH

Zielstellung:

Methode: Ansatz einer elastischen Rolle zwischen vollkommen unelastischen Platten [7/S.329], mit Rücksicht auf die zu gewährleistende Beweglichkeit der Lager wurde die zulässige Belastung der Rollen nochmal halbiert

Ergebnis: Für Schmiedeeisen: $P = 6,2 D$ (offenbar Schweißisen); Gusseisen: $P = 8,8 D$; Stahl: $P = 19,1 D$
Mit $D =$ Durchmesser [cm], $P =$ zulässige Last [kg/cm] [7/S.330]

Literatur: [7]Baentsch, J.: Ueber die Festigkeit von Rollenlagern. Deutsche Bauzeitung 10 (1876), S.329-330.
[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.
[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.

K2- 11: 1878 – GRASHOF

Zielstellung:

Methode: Annahme einer gleichmäßigen Druckverteilung in der Platte [57/S.44]

Ergebnis:
$$P = \sqrt{\frac{32}{9} \cdot k^3 \cdot a \cdot \left(\frac{a}{E} + \frac{a_1}{E_1} \right)}$$
 Mit $k =$ maximale Spannung; $a, a_1 =$ Radius der Walze, Dicke der Platte, $E, E_1 =$ Koeffizienten, nicht (!) Elastizitätskoeffizienten [316/S.51], [105/S.133]; von Grashof keine Angaben zur Besetzung der Koeffizienten gemacht; Formeln offenbar fehlerhaft [51/S.203]

Literatur: [316]Grashof, F.: Theorie der Elastizität und Festigkeit. Berlin: Rudolf Gaertner, 1878.
[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.
[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.
[51]Johnson, J.B.: Relation between total load and maximum stress, when one cylinder rests on another at right angles to it. Transactions of the Society of Civil Engineers 21 (1889), S.203-20.

K2- 12: 1881 – HERTZ

Zielstellung: Ermittlung einer exakten Lösung für Form und Größe der Druckfigur und für die Verteilung des senkrechten Druckes in der Druckfläche [317/S.156]

Methode: Ausgang von den Elastizitätsbedingungen isotroper Körper sowie von Anschauungen über die Verteilung der Elektrizität bestimmten Potentials auf zwei sich berührende Körper [57/S.48], [79/S.6]; Untersuchungen beschränkt auf die Berührungsfläche und ihre unmittelbare Umgebung, Abgleich mit Versuchen – siehe K1- 4

Ergebnis:
$$a = 1,52 \sqrt{\frac{p \cdot r}{E}} \text{ bzw. } p_0 = 0,42 \sqrt{\frac{p \cdot E}{r}}$$
 Mit $p =$ Belastung in kg/cm [305/S.170]

Literatur: [317]Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für reine und angewandte Mathematik 92 (1881), S.155-171.
[318]Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes (1882). In: Lenard, Ph.: Schriften vermischten Inhalts von Heinrich Hertz. Vaduz: Sändig, 1988.
[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.
[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.
[304]Föppl, A.: Vorlesungen über Technische Mechanik. Leipzig u. Berlin: Teubner, 1920.

K2- 13: 1882 – STEINER

Zielstellung:

Methode: Ermittelt auch eine von der maximalen Spannung abhängige Formel für die Berührung von Platte und Zylinder, die Ebene als starr annehmend [236/S.400]; gibt aber einen konkreten Wert für die maximale Spannung an

Ergebnis:

$$r = \sqrt{\frac{9}{32} \cdot \frac{E}{\left(1 + \frac{d}{r}\right) \cdot \sigma^3}} \text{ mit } \frac{d}{r} = 0,6 \text{ folgt}$$

Für Stahl: mit $E = 2750 \text{ t/cm}^2$ und $\sigma = 1,5 \text{ t/cm}^2$ folgt: $r = 12 \cdot P$

Für Gusseisen schließt STEINER auf $r = 15 \cdot P$ [236/S.400]; [57 /S.44]

Literatur: [236]Schäffer, Th.; Sonne, Ed. (Hrsg.): Handbuch der Ingenieurwissenschaften. 2.Bd.: Der Brückenbau. 2.Abth.: Eiserne Brücken, Bewegliche und Aquaduct-Brücken. Leipzig: Engelmann, 1882.

Darüber hinaus in

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

K2- 14: 1888 – HÄSELER

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis:

$$n = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{E}{s_1^3 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_1}{d}\right)}} \cdot \frac{A}{b \cdot d} \text{ mit}$$

b, d = Länge, Durchmesser der Walzen [cm], h_1 = Dicke der Platte [cm], A = Auflagerdruck [t]

E = Elastizitätsmodul [kg/cm²], s_1 = zulässige Beanspruchung des Materials [kg/cm²]

n = Anzahl der Walzen; Danach gilt für Gusseisen

$$\text{mit } s_1 = 800 \text{ kg/cm}^2, E = 960\,000 \text{ kg/cm}^2, h_1/d = \frac{1}{2}: n = 46 \cdot \frac{A}{b \cdot d}$$

$$\text{mit } s_1 = 1000 \text{ kg/cm}^2 \quad n = 33 \cdot \frac{A}{b \cdot d} \text{ und für Gussstahl}$$

$$\text{mit } s_1 = 1200 \text{ kg/cm}^2, E = 2\,000\,000 \text{ kg/cm}^2 \quad n = 36 \cdot \frac{A}{b \cdot d}$$

Literatur: [161]Häselser, E.: Der Brückenbau – Ein Handbuch zum Gebrauche beim Entwerfen von Brücken in Eisen, Holz und Stein. 1.Teil: Die eisernen Brücken. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1908.

Hinweis: Die Ausgabe von 1888 lag dem Verfasser nicht vor. Für die Ausgabe von 1908 scheint Häselser das Kapitel zur Berechnung der Walzen offenbar jedoch unverändert übernommen zu haben, was der inhaltliche Abgleich mit [57] und [105] bestätigt.

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälz Gelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

[105]Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover 40 (1894), S.131-144, 571-574.

K2- 15: 1889 – REULEAUX

Zielstellung: „statthafte Einheitspressung auf den Rollenumfang“ [340/S.510]

Methode:

Ergebnis:

$$\sigma = 0,83 \cdot \sqrt[3]{E} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{P}{l \cdot r}\right)^2} \text{ bzw. } \frac{P}{l \cdot r} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{\sigma^3}{E}} \quad [340/S.510]$$

Daraus folgen für Lager aus

Gusseisen: $P/lr = 0,30 \dots 0,36$

Schmiedeeisen: $P/lr = 0,24 \dots 0,29$

Gussstahl: $P/lr = 0,77 \dots 0,99$; Angaben in kg bzw. mm;

Literatur: [340]Reuleaux, R.: Konstrukteur. 4.Aufl. Braunschweig: Vieweg, 1882-89.

[109]Zechlin, M.R.: Kugel- und Rollenlager. Theorie, Berechnung und praktische Beispiele. Berlin: Polytechnische Buchhandlung A.Seydel, 1900.

K2- 16: 1889 – TETMAJER

Zielstellung:

Methode: Bezieht sich – ohne Quellenangabe – auf einen Ansatz von CULMANN:

Dieser nimmt konstante Formänderungen λ längs der Berührungsfläche von Walze und Ebene im Verhältnis $\lambda=0,5$ bei gleichem Material an [349/S.147], [350/S.271ff]

Ergebnis:

$$N = \frac{1}{3} \cdot d \cdot l \cdot \sigma_m \cdot \sqrt{16 \cdot \frac{\sigma_m}{\varepsilon}} \text{ mit } N = \text{Auflagerdruck, } \varepsilon = \text{Elastizitätsmodul}$$

σ_m = maximale Spannung, d, l = Durchmesser, Länge der Walze

Eingesetzt für

harten Stahl: $\varepsilon = 2200 \text{ t/cm}^2$, $\sigma_m = 1,72 \text{ t/cm}^2$

weiches Flusseisen $\varepsilon = 2100 \text{ t/cm}^2$, $\sigma_m = 1,23 \text{ t/cm}^2$

Schweißisen $\varepsilon = 2000 \text{ t/cm}^2$, $\sigma_m = 1,02 \text{ t/cm}^2$

Gusseisen $\varepsilon = 1000 \text{ t/cm}^2$, $\sigma_m = 0,80 \text{ t/cm}^2$

Folgt für Stahl: $n \cdot l \cdot d = 16 \cdot A$

Folgt für Flusseisen: $n \cdot l \cdot d = 25 \cdot A$

für Schmiede-/Gusseisen: $n \cdot l \cdot d = 33 \cdot A$

Literatur: [349]Tetmajer, L.v.: Die Baumechanik. II.Theil: Die angewandte Elasticitäts- und Festigkeitslehre. Zürich: Zürcher und Furrer, 1889.

[350]Tetmajer, L.v.: Elasticitäts- und Festigkeitslehre. Leipzig: Deuticke, 1905.

[57]Kollmar, A.: Auflager und Gelenke. Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern u. Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn, 1919.

[286]Bach, C.v.: Bücherschau: Die angewandte Elasticitäts- und Festigkeitslehre, von L.Tetmajer. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 33 (1889), S.476-478.

K2- 17: 1889 – BACH

Problem: Im Allgemeinen Ansatz gleicher Formänderungen von Walze und Platte bei der Herleitung von Formeln, Versuche mit Hartblei (siehe K1- 6) ergaben jedoch, daß die Formänderung größtenteils nur in der Walze – kaum in der Platte – stattfindet [286/S.476f]

Zielstellung: Herleitung einer Formel, wobei die Abplattung der Berührungsfläche allein durch die Walze herbeigeführt wird [286/S.477]

Methode: gleiches Material für Walze und Platte angesetzt

Ergebnis:

$$P = \frac{2}{3} \cdot d \cdot l \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k^3}{E}} \text{ mit } P, E = \text{zu übertragende Kraft, E-Modul des Walzenmaterials}$$

d, l = Durchmesser, Länge der Walze; k = zulässige Spannung des Materials

Nach [286/S.477] folgt daraus

Für harten Stahl: $E = 2\,250\,000$ und $k = 2000$ folgt: $P = 56 \cdot d \cdot l$

Für Gusseisen: $E = 900\,000$ und $k = 900$ folgt: $P = 25 \cdot d \cdot l$

Literatur: [286]Bach, C.v.: Bücherschau: Die angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre, von L.Tetmajer. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 33 (1889), S.476-478.

[3]Bach, C.: Versuche über die Formänderung der Rollen (Cylinder, Walzen) und Platten von Rollenlagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 38 (1894), S.199.

K2- 18: 1892 – GALLIOT

Zielstellung: Berechnung der Belastung des Metalls bei Berührung unterschiedlich gekrümmter Zylinder [19/S.1160, Fußnote]

Methode:

Ergebnis:

$$p = 2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot E}{15 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{C \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right)}$$

mit C = Auflagerkraft pro Längeneinheit, R und R_1 = Radien; bei Zylinder gegen Ebene folgt

$$p = 2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot E}{15 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{C}{R}} \text{ [19/S.1160, Fußnote]}$$

Literatur: [19]Deslandres, M.H.: Expériences sur la Résistance des Rouleaux Métalliques. Annales des Ponts et Chaussées. 7.Serie (1893), S.1160-1174.

K2- 19: um 1892 – MARSTON

Zielstellung: (A) Theoretische Interpretation der Ergebnisse mit polarisiertem Licht (vgl.K1- 9)
(B) Ableitung einer praktisch nutzbaren Formel, da die bis dato in den USA verwendeten Formeln nur eingeschränkt gültig [17/S.120,121], dazu wieder Einführung einer aus Versuchen zu ermittelnden Konstante [17/S.122]

Methode: Definition von Randbedingungen wie unter Einbaubedingungen der Lager im Brückenbau, Voraussetzung rein elastischer Verformungen für die allgemeine Lösung [17/S.110], daraus Ableitung einer „praktischen Formel“ für zulässige Belastungen (safe loads) von Lagerwalzen [17/S.119]

Ergebnis:

$$W_s = \frac{1}{f} \cdot C \cdot d \text{ mit } W_s = \text{safe Load (zulässige Belastung), } C = \text{empirische Konstante =}$$

880 lbs/inch (aus K1- 13); [17S.125], f = Sicherheitsfaktor [17/S.124]

Literatur: [17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.

K2- 20: 1905 – TETMAJER

Zielstellung:

Methode: Ähnlicher Ansatz wie in K2- 16, allerdings konservativer in Bezug auf die zulässigen Spannungen im Kontaktbereich, vorausgegangen waren Versuche an der Materialprüfanstalt des Züricher Polytechnikums (K1- 14)

Ergebnis: Sehr differenzierter Ansatz, für Grauguss $N = 0,020 \text{ dl}$; Schweißisen $N = 0,021 \text{ dl}$; Flusseisen $N = 0,033 \text{ dl}$; Stahlguss $N = 0,014 \dots 0,020 \text{ dl}$; Flusstahl $N = 0,067 \text{ dl}$;
Mit $N =$ Belastung pro Zylinder in t ; d und l in cm

Literatur [350]Tetmajer, L.v.: Elastizitäts- und Festigkeitslehre. Leipzig: Deuticke, 1905.

K2- 21: 1905 – VIANELLO

Zielstellung:

Methode: Gleichmäßige Lastverteilung und Ansatz hoher Beanspruchung des Materials [259/S.477]

Ergebnis: Für Stahlguss und Gusseisen gilt bei Kontakt Zylinder/Platte $r \cdot l = 10 \cdot P$
Mit $P =$ Auflagerdruck in t ; r , $l =$ Radius, Länge in cm

Literatur: [259]Vianello, L.: Der Eisenbau. München: Oldenburg, 1905.

K2- 22: 1905 – KRÜGER

Zielstellung:

Methode: Offenbar empirisch ermittelte Formeln, nach Voll- und Flachwalzen getrennt

Ergebnis: Gusseisen – Vollwalzen: $n = \frac{0,046A}{b \cdot d}$, Flachwalzen: $n = \frac{0,043A}{b \cdot d}$
Gusstahl – Vollwalzen: $n = \frac{0,036A}{b \cdot d}$, Flachwalzen: $n = \frac{0,034A}{b \cdot d}$

Mit $A =$ Auflagerdruck [kg], $b =$ Walzenlänge und $d =$ Walzendurchmesser [cm]

Literatur: [185]Krüger, R.: Leitfaden des Brückenbaues. Leipzig: Weber-Verlagsbuchhandlung, 1905.

K2- 23: 1908 – SCHAPER

Zielstellung:

Methode: Grundlage Hertz'sche Formel

Ergebnis: $A =$ Auflast in [t], Länge l , Durchmesser d [cm]: zul. Hertz'sche Pressung für Einrollenlager...

aus Stahlguss: $6,5 \text{ t/cm}^2 : d \cdot l = 19 \cdot A$

aus Gusseisen: $4 \text{ t/cm}^2 : d \cdot l = 23 \cdot A$

aus Flusseisen: $5 \text{ t/cm}^2 : d \cdot l = 31 \cdot A$; für Zweirollenlager...

aus Stahlguss: $6,5 \text{ t/cm}^2 : 2 \cdot d \cdot l = 19 \cdot A$

aus Gusseisen: $4 \text{ t/cm}^2 : 2 \cdot d \cdot l = 23 \cdot A$

aus Flusseisen: $5 \text{ t/cm}^2 : 2 \cdot d \cdot l = 31 \cdot A$; für Mehrrollenlager...

aus Stahlguss: $6,0 \text{ t/cm}^2 : n \cdot d \cdot l = 22 \cdot A$

aus Gusseisen: $3,5 \text{ t/cm}^2 : n \cdot d \cdot l = 29 \cdot A$

aus Flusseisen: $4,5 \text{ t/cm}^2 : n \cdot d \cdot l = 38 \cdot A$; [237/S.358ff]

Literatur: [237]Schaper, G.: Eiserne Brücken. 1.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1908.

K2- 24: 1911 – BERNHARD

Zielstellung:

Methode: Grundlage Hertz'sche Formel

Ergebnis: Für Einrollenlager aus Stahlguss: zul. Hertz'sche Pressung $6 \dots 7 \text{ t/cm}^2$ und aus Gusseisen: zul. Hertz'sche Pressung $< 4 \text{ t/cm}^2$ empfohlen;

bei mehreren Rollen mit $A =$ Auflast in [t], Länge l und Durchmesser d [cm]:

Stahlguss: $n \cdot d \cdot l = 28 \dots 40 \cdot A$ mit $zul_ \sigma_H = 5,25 \dots 4,5 \text{ t/cm}^2$

Gusseisen: $n \cdot d \cdot l = 40 \dots 56 \cdot A$ mit $zul_ \sigma_H = < 3,0 \text{ t/cm}^2$ [126/S.352]

Literatur: [126]Bernhard, K.: Eiserne Brücken. Berlin: Verlag Deutsche Bauzeitung, 1911.

K2- 25: 1915 – RASCH

Problem: Versuche an Gussstahlkugeln (siehe K1- 16) zeigten, dass Formänderungen deutlich schneller – die Flächenpressungen demnach deutlich langsamer – steigen, als nach Hertz. Hertz'sche Formeln demnach für Berechnung von Kugel- und Rollenlager ungeeignet [79/S.2] und bedürfen einer Berichtigung [79/S.6]; die Frage nach zulässigen Belastungen für Brückenlager ist theoretisch also noch nicht gelöst worden, erschöpfende Versuche nicht bekannt [79/S.6]

Zielstellung: Berichtigung der Hertz'schen Formeln [79/S.1]

Methode: Aus dem Fall „Sphärische Berührung“ (Kugellager) – bestätigt durch Versuche (siehe K1- 19) – Ableitung einer berichtigten Hertz'schen Formel für den Fall „Linienberührung“ (Rollenlager)

Ergebnis: Korrigierte Hertz'sche Formel für die Flächenpressung p

$$p = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \pi}{8 \cdot L \cdot \beta^3}} \cdot \frac{P^{1-\frac{3n_1}{2}} \cdot E^{\frac{3n_1}{2}}}{R^{\frac{3-6n_1}{2}}} \text{ mit } R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \text{ und } \beta, n = \text{Materialfaktoren}$$

Formel durch Versuche nicht bestätigt, Übereinstimmung jedoch sehr wahrscheinlich

Literatur: [79]Rasch, E.: Über die Berechnung der an Kugel- und Rollenlagern auftretenden Materialspannungen. Eisenbau 6 (1915), S.1-8.

[78]Rasch, E.: Prüfung von Gussstahlkugeln. Zeitschrift für Werkzeugmaschinen und Werkzeuge (1899), S.301-303, 319-320.

[9]Berndt, G.: Über die Gültigkeit der Hertz'schen Formeln zur Berechnung der Abplattung von Meßkörpern. Zeitschrift für technische Physik 3 (1922), S.14-21, 82-87.

K2- 26: 1924 – BLEICH

Zielstellung:

Methode: Ausgehend von den Versuchen Dumas' (vgl. K1- 21) Ableitung eines einfachen Zusammenhangs zwischen zulässigem Berührungsdruck und Brinell-Härte [128/S.563]

Ergebnis: $zul_ p_0 = \frac{1}{3} \cdot H_B$; mit $H_B =$ Brinell-Härte; $P_0 =$ Berührungsdruck

Literatur: [128]Bleich, Fr.: Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin: Springer, 1924.

Problem: Methode nach Hertz nicht zur Berechnung von Kugeln und Zylinderrollen geeignet

Zielstellung: Vereinfachter Ansatz

Methode: Maximale Schubspannung als Versagenskriterium betrachtet [39/S.821]

Ergebnis:

$$P = \frac{8}{3} \cdot r \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{d,max}^3}{E}} \quad \text{für } E_r = E_p = E$$

Mit r = Radius der Walze; b = Rollenlänge; $\sigma_{d,max}$ = größte Druckspannung in der Mitte

Literatur [39]Fleischhauer, K.H.: Die Tragfähigkeit von Zylinderrollen und Kugeln. VDI-Zeitschrift 107 (1965), S.821-822.

Katalog K3 – Versuche zum Reibungsproblem

K3- 1: 1882 – PÉRISSÉ

- Problem:** Keine Werte zum Reibwiderstand von Rollen bekannt [75/S.360]
- Zielstellung:** Bestimmung des Rollwiderstandes, Ermittlung der Abhängigkeit zwischen Gleit- und Rollwiderstand [75/S.361]
- Methode:** Versuche mit 2 gußeisernen Walzen (d= 10,1cm; l= 40cm, Achsabstand 85cm, durch Rahmen gehalten) zwischen ebenen, gehobelten Platten, mit 5 bis 6 t belastet, stufenweise erhöht um 0,5kg [75/S.360f]; Insgesamt 3 Testserien:
1. Serie: mit sauberen Platten
2. Serie: untere Platte mit Sand bestreut
3. Serie: ohne Walzen für Abhängigkeit Gleit-/Rollwiderstand [75/S.361]
- Erkenntnis:** Reibfaktor Gusseisen/Gusseisen mit ca. 18/100 bestätigt, Rollwiderstand von Walzen unter normalen Bedingungen ca. 7/1000; Rollwiderstand steigt bei besandeter Oberfläche auf 3,5/100, d.h. wird ca. 5 x größer; Gleitwiderstand ca. 25 x höher als Rollwiderstand; [75/S.363]; Für den Brückenbau empfohlen: Rollwiderstand T (im elastischen Bereich) zu berechnen durch
- $$T = \frac{0,35}{d} \cdot P \text{ mit } P = \text{Belastung, } d = \text{Durchmesser in cm. [75/S.364]}$$
- Brückenbauern wird der Einbau von „Apparaten mit Gelenk“ (offenbar Kipplager gemeint, A.d.Verf.) empfohlen [75/S.364]
- Bei Brücken ab 18...20m Länge sollte Rollenlager eingebaut werden [75/S.365], Gleitwiderstand (aus der Ruhe) im Mittel 18% der Auflast, unter Praxisbedingungen durchaus auch höher - bis über 50% der Auflast [110/S.56].
- Literatur:** [75]Périsse, M.: Frottement des poutres libres sur glissières et sur rouleaux en fonte. In: Résumé des Procès-Verbaux des Séances du mois d'Octobre 1883. Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France (1883), S.349-380.
[110]N.N.: Périsse's Versuche über rollende und gleitende Reibung an den Stützpunkten von Eisenträgern. Dinger's Polytechnisches Journal 251 (1884), S.55-57.
-

K3- 2: 1886 – WING

- Problem:**
- Zielstellung:** Bestimmung der Rollreibung von Rollenlagern [17/S.99]
- Methode:** Versuche an gebrauchten Rollenlagern ohne vorherige Aufarbeitung; Walzen mit 1,2,3 und 4 inchs Durchmesser; Walzen und Platten aus verschiedenen Materialien [17/S.99f]
- Erkenntnis:** Reibung durch Plattenmaterial beeinflusst: bei schmiedeeisernen Platten ca. 13% größer – bei stählernen ca. 13% geringer als bei gußeisernen Platten [17/S.100]; Reibung pro Längeneinheit beträgt
- $$\frac{0.0063}{\sqrt{r}} \text{ für gusseiserne Rollen}$$
- $$\frac{0.0130}{\sqrt{r}} \text{ für schmiedeeiserne Rollen}$$
- $$\frac{0.0073}{\sqrt{r}} \text{ für stählerne Rollen;}$$
- Jeweils erhöht um 13% bei schmiedeeisernen Platten, verringert um 13% bei stählernen Platten [17/S.101], Formeln geben mit zunehmendem Radius, z.B. bei Wagenrad/Schiene zunehmend ungenaue Werte; [17/S.102]
- Literatur:** [17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.
-

K3- 3: 1901-07 – Verein Deutscher Ingenieure

Problem:	Mangelnde Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit
Zielstellung:	(A) Ermittlung der Tragfähigkeit – siehe hierzu K1- 18 (B) Ermittlung der Beweglichkeit von Rollen- und Kipplagern [90/S.3]
Methode:	An Rollen aus Thomaseisen ($d= 3\dots 15\text{cm}$, $l=15\dots 75\text{cm}$) zwischen ebenen Platten [90/S.3] Bei Hin- und Herbewegungen großer Verschiebungsweg gewählt; Verschiebungswiderstände mehrmals gemessen; Einfluss der Hobelrichtung (quer bzw. längs zur Walzenrichtung) geprüft; bei einigen Versuchen Einfluss von Verunreinigungen geplant, jedoch aus Zeitmangel nicht ausgeführt; Versuche auch bei Belastungen jenseits der Fließgrenze [90/S.7]
Erkenntnis:	zu (B): schon bei kleinen Belastungen Wulstbildung am Ende des Rollweges Reibung unmittelbar nach Änderung der Bewegungsrichtung am größten [90/S.10], [47/S.33] Hobelrichtung der Platten ohne erkennbaren Einfluß auf den Reibungsbeiwert [90/S.3] Beweglichkeit auch bei hohen Belastungen vorhanden [90/S.58] Reibungszahl proportional zur Belastung [90/S.56], [128/S.570] gesetzmäßiger Einfluss des Durchmessers auf Reibungszahl nicht zu erkennen [128/S.570]
Literatur:	[90]Stamer: Versuche mit Rollenlagern. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Berlin: Selbstverlag, 1915. [47]Hakenjos, V.: Untersuchungen über die Rollreibung bei Stahl im elastisch-plastischen Zustand. Diss. TH Stuttgart, 1967. [80]Rasch, E.: Zur Theorie und Praxis der rollenden Reibung und der in Wälzlagern auftretenden Materialbeanspruchungen. Eisenbau 7 (1916), S.13-17. [128]Bleich, Fr.: Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin: Springer, 1924.

K3- 4: um 1910 – GEHLER

Problem:	Größe der Rollreibungskraft der Lager der Hallendachbinder am Hauptbahnhof Leipzig für Bemessung der darunterliegenden Umfassungsmauer unbekannt [152/S.70,76]; weder aus Fachliteratur noch Versuchsanstalten Erfahrungen zur Reibungskraft bei besonders hohen Auflagerdrücken – hier 170 t – bekannt [152/S.77]
Zielstellung	Ermittlung von Reibungsbeiwerten bei hohen Auflasten
Methode:	Versuche mit Gussstahl mit 60 kg/mm^2 Druckfestigkeit und 12% Dehnung, gehobelte bzw. abgedrehte, anschließend geschmirgelte und polierte Walzflächen [152/S.77f],
Erkenntnis:	1. Versuch: ohne Schmiermittel: $R=360\text{kg}$ bei $A=170\text{t}$ → 0,2%, dabei Wert nicht konstant, sondern von deformierter Laufbahn abhängig; 2. Versuch: mit Graphitschmiere: $R=530\text{kg}$ bei $A=170\text{t}$ → 0,3%; 3. Versuch: mit Graphitschmiere, Öl und Sand: $R=2600(!)\text{kg}$ bei $A=170\text{t}$ → 1,5% (Wert überraschend groß empfunden) $R=2600\text{kg}$ „mit reichlicher Sicherheit“ der Bemessung zugrunde gelegt [152/S.78]
Literatur:	[152]Gehler: Querbahnsteighalle in Eisenbeton für den Hauptbahnhof in Leipzig. Deutsche Bauzeitung 46 (1912), S.65-71, 73-78, 84-88.

K3- 5: 1950 – FÖPPL, L.

Problem:

Zielstellung: Bestimmung des reinen Rollwiderstands zylindrischer Walzen [308/S.399]

Methode: Zylindrische Walzen rollen unter Normaldruck aufeinander ab [308/S.399]

Erkenntnis: Als Zwischenstand seiner Versuchsreihen bekanntgegeben, dass Versuchsergebnisse sich in guter Annäherung wiedergeben lassen durch

$$P = \chi \cdot \sqrt{N \cdot \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}} \text{ mit } \chi = rd \cdot 1 \cdot 10^{-5} \text{ cm ; } P \text{ [kg/cm], } r \text{ [cm], } E \text{ [kg/cm}^2\text{], [308/S.399]}$$

Literatur: [308]Föppl, L.: Mechanik starrer Körper. In: „Hütte“- des Ingenieurs Taschenbuch. 27.Aufl.,1.Bd. Berlin: Ernst & Sohn, 1950.

K3- 6: 1962 – UETZ; HAKENJOS

Problem: Fehlende Rollreibungswerte für Corroweld-Lager [98/S.537]

Zielstellung: Ermittlung von Rollreibungsbeiwerten neuartiger Lager (Corroweld-Lager) als Voraussetzung für die amtliche Zulassung [98/S.537]

Methode: Kurzzeit- und Dauerversuche unter Auflasten entsprechend der jeweilig zulässigen Hertz'schen Pressungen zur Ermittlung des Reibungsverhaltens. Probeabmessungen auf Anwendung für Brückenlager abgestimmt [98/S.537]

Erkenntnis: übliche Wallbildung mit der Erhöhung der Rollreibung, aber unter Praxisbedingungen in dieser Form nicht zu erwarten [98/S.543]

Rollwiderstand ohne festen Wert, abhängig von diversen Einflussgrößen [98/S.537], [47/S.35]

Zunahme der Vickershärte im überrollten Bereich [98/S.541]

Corroweldlager mit vergleichsweise günstiger Reibungszahl [98/S.543]

Literatur: [98]Uetz, H.; Hakenjos, V.: Rollreibungsversuche mit Brückenlagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 106 (1964), S.537-543.

[47]Hakenjos, V.: Untersuchungen über die Rollreibung bei Stahl im elastisch-plastischen Zustand. Diss. TH Stuttgart, 1967.

K3- 7: 1967 – HAKENJOS

Problem: Ungenügende Kenntnis des Rollreibungsverhaltens von Stählen im elastisch-plastischen Zustand [47/S.64]

Zielstellung: Entwurf und Bau einer Prüfanlage, Entwicklung von Prüf- und Meßverfahren, Bestimmung des Verformungs- und Rollreibungsverhaltens von Walzen und ebenen Platten aus verschiedenen Werkstoffen [47/S.11,13]

Methode: Versuche an üblichen Werkstoffen St 37, GS 52 und C 35, dazu hochfeste Werkstoffe, wie St 80, C 60, X40Cr13, 50 CrV4, Walzen mit Durchmesser 50, 100, 150 und 200 mm, Länge 150 mm gewählt [47/S.64]

Erkenntnis: Beim Rollvorgang bleibende Verformungen mit Auswirkungen auf die Wälzfläche, Wallbildung am Ende des Laufweges bewirkt Zunahme der max. Reibungszahl, bei extrem langsamer Geschwindigkeit vergleichsweise hohe Reibungszahlen [47/S.66]

Rollreibungszahl konvergiert nach einigen wenigen Überrollungen, Zunahme der Reibung ist bei abnehmender Plattenhärte wesentlich größer als bei abnehmender Walzenhärte [47/S.66]

Hochfeste Lagerarten mit geringerer Reibung als herkömmliche Lager [47/S.67]

Ableitung von Rollreibungszahlen im elastisch-plastischen Bereich, Zusammenhänge zwischen Rollreibungszahl, Hertz'scher Pressung und Härte dargestellt [47/S.116ff]

Literatur: [47]Hakenjos, V.: Untersuchungen über die Rollreibung bei Stahl im elastisch-plastischen Zustand. Diss. TH Stuttgart, 1967.

Problem:

Zielstellung: Ermittlung der durchschnittlichen und maximalen Rollreibungszahlen hochfester Rollenlager [69/S.3]

Methode: Versuche an Rollkörpersatz aus St80 durch Kurzzeitversuch mit 10 Überrollungen [69/S.3]
Belastungen von 950, 1200, 1500 Mpa Hertz'scher Pressung bei Geschwindigkeit von 0,083 mm/s, erster Hub nach 10-minütiger Belastung [69/S.4]

Erkenntnis: durchschnittliche Reibungszahl nimmt anfangs ab, konvergiert nach 2...3 Hieben gegen festen Wert, maximale Reibungszahl nimmt wegen Wallbildung stetig zu [69/S.5]

Literatur: [69]Maissen, A.: Versuche mit Brückenlagern. Schweizerische Bauzeitung 96 (1978), S.3-12.

Katalog K4 – Bemessungsansätze zum Reibungsproblem

K4- 1: 1831 – GERSTNER

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung:
Mit Verweis auf Versuche von Coulomb Angabe verschiedener Reibungskoeffizienten für Reibpartner aus Holz oder Metall, für Eisen/Eisen gilt

$$\mu = \frac{2}{7}, \text{ unter Anwendung von Talg } \mu = \frac{1}{10} \text{ [313/S.494]}$$

Rollende Reibung:

$$F = \mu' \cdot \frac{M}{r} \text{ mit M= Belastung, r= Radius [313/S.496f]}$$

Literatur: [313]Gerstner, Fr.J. Ritter v.: Handbuch der Mechanik. Bd.1: Mechanik fester Körper. Prag: Spurny, 1831.

K4- 2: 1832 – EYTELWEIN

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung:
Mit Verweis auf Versuche von Coulomb Angabe verschiedener Reibungskoeffizienten für Reibpartner aus Holz oder Metall,

$$\text{für Eisen/Eisen gilt } \mu = \frac{2}{7}, \text{ unter Anwendung von Talg } \mu = \frac{1}{10} \text{ [299/S.253f]}$$

$$\text{Rollende Reibung: } F = \mu' \cdot \frac{M}{r} \text{ mit M= Belastung, r= Radius [299/S.259]}$$

Literatur: [299]Eytelwein, D.J.A.: Handbuch der Statik fester Körper. Berlin: Reimer, 1832.

K4- 3: 1845 – WEISBACH

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung:
Mit Verweis auf Versuche von Coulomb, Morin, Rennie Angabe verschiedener Reibungskoeffizienten; für Metall/Metall gilt

$$\mu = 0,15 \dots 0,24, \text{ im Mittel } 0,18 \text{ bei trockener Reibung aus der Ruhe [356/S.161]}$$

$$\text{Wälzende Reibung: } F = (f + f_1) \cdot \frac{R}{r}$$

mit R= Belastung, r= Radius, f als Reibung in den Kontaktpunkten zwischen den beiden Lagerflächen, keine Angabe von Werten für Metalle [356/S.181]

Literatur: [356]Weisbach, J.: Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik. Braunschweig: Vieweg und Sohn, 1845.

K4- 4: 1850 – WEISBACH

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Reibung proportional zur Auflast, unabhängig von Ausdehnung der Berührungsflächen und Geschwindigkeit [357/S.401]

Gleitende Reibung: $F = \varphi \cdot N$, N=Auflast, viele Reibungskoeffizienten angegeben, z.B.

Schmiedeeisen auf Gusseisen – trocken: 0,19

Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen – trocken: 0,13

Gusseisen auf Gusseisen – fettig: 0,16 [357/S.404]

Wälzende Reibung: unbedeutend gegenüber Gleit- und Zapfenreibung [357/S.409]

Für hölzerne und eiserne Walzen entsprechend Abbildung (doppelter Kontakt pro Walze) gilt

$$F = 0,04 \dots 0,06 \cdot \frac{R}{r} \text{ mit } r = \text{Walzenradius [Zoll]}, R = \text{Auflast [Pfund]} [357/S.410]$$

Wälzende Reibung damit umgekehrt proportional zum Walzenradius.

Formel umgerechnet mit $r = \text{Walzenradius [cm]}$, $A = \text{Auflast [kg]}$

$$F = 0,10 \dots 0,15 \cdot \frac{A}{r} \rightarrow \text{im Mittel für } d=2r \text{ folgt } F = 0,25 \cdot \frac{A}{d}$$

Literatur: [357]Weisbach, J.: Der Ingenieur – Sammlung von Tafeln, Formeln und Regeln. Braunschweig: Vieweg und Sohn, 1850.

K4- 5: 1857 – „Hütte“ – des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Aufl.

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung proportional zur Auflast, unabhängig von Ausdehnung der Berührungsflächen, von der Adhäsion und Geschwindigkeit [635/S.64]

Reibungskoeffizient $\mu =$

Gusseisen auf Gusseisen (wenig geschmiert) – 0,16

Schmiedeeisen auf Gusseisen (trocken) – 0,19

Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen (wenig fettig) – 0,13

Rollende Reibung proportional zur Auflast, umgekehrt proportional zum Radius; [634/S.64ff]

Literatur: [634]Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Theil. 1.Aufl. Berlin: Ernst & Korn, 1857.

K4- 6: 1857 – MOLINOS; PRONNIER

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung:
Reibungskoeffizient bei gusseisernen Platten nicht unter $f=0,5$,

Wälzende Reibung:

Reibungskoeffizient $f=0,05$ für übliche Rollendurchmesser von 0,10...0,12 [offenbar in Meter, Einheit nicht angegeben; A.d.Verf.] [210/S.84]

Literatur: [210]Molinos, L.; Pronnier, C.: Traité théorique et pratique de la Construction des Ponts Métalliques. Paris : A. Morel et Ce, 1857.

K4- 7: 1867 – HEINZERLING

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung: Angaben verschiedenster Faktoren, zum Beispiel
Gusseisen auf Gusseisen – trocken: 0,23
Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen – trocken: 0,13
Gusseisen auf Schmiedeeisen – trocken: 0,19
Metall auf Metall im Mittel: 0,18 [162/S.82f]

Literatur: [162]Heinzerling, F.: Die angreifenden und widerstehenden Kräfte der Brücken- und Hochbau-Constructions. Berlin: Ernst & Korn, 1867.

K4- 8: 1875 – WINKLER

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung: Koeffizient ca. 0,2 bei Eisen/Eisen, bei Verschmutzung oder Rost auch größer [108/S.271]; ab Spannweite ca. 30m Rollenlager empfohlen [108/S.256],
Wälzende Reibung: $\varphi = 1,5 / d$, d [mm] [108/S.248, 271]

Literatur: [108]Winkler, E.: Die Gitterträger und Lager gerader Träger. 2.Aufl. Wien: Carl Gerold's Sohn, 1875.

K4- 9: um 1895 – Königlich Bayerische Staatsbahnen

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Wälzende Reibung: $\mu = 0,25$ [391/P.37]

Literatur: [391]Königl. Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Grundlagen für Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen, 1895. In: [676/352/f].

K4- 10: 1902 – „Hütte“ – des Ingenieurs Taschenbuch, 19.Aufl.

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Umfangreiche Angaben von Reibungszahlen mit Bezug auf Versuche Rennies, Morins und Galtons (vgl. dazu Tab. 26), auch für variierende Flächenpressungen [635/S.202ff]

Literatur: [635]Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Abtg. 18.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1902.

K4- 11: 1905 – KRÜGER

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung: Gleitlager sind einzufetten, um Reibung zu reduzieren,

$$R = \frac{1}{4} \dots \frac{1}{7} \cdot A \text{ mit } A = \text{Auflagerdruck [185/S.411]}$$

Rollende Reibung abhängig von Auflagerdruck, Walzendurchmesser u. Grad der Einfettung:

$$\text{Geringe Einfettung: } R = \frac{0,25A}{d}; \text{ Sorgfältige Einfettung: } R = \frac{0,15A}{d} \text{ in [kg] [185/S.416]}$$

Literatur: [185]Krüger, R.: Leitfaden des Brückenbaues. Leipzig: Weber-Verlagsbuchhandlung, 1905.

K4- 12: 1905 – VIANELLO

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,3$ [259/S.476]; Wälzende Reibung: $\mu = \frac{1}{7 \cdot d}$ [259/S.482]

Literatur: [259]Vianello, L.: Der Eisenbau. München: Oldenburg, 1905.

K4- 13: 1908 – Königlich Bayerische Staatsbahnen

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende und Wälzende Reibung: $\mu = 0,25$ [403/P.II.f]

Literatur: [403]Königlich Bayerische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Ausführung eiserner Brücken- u. Hochbaukonstruktionen. München: Hafner, 1908.

K4- 14: 1908 – HÄSELER

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende und Wälzende Reibung: 0,20; Wälzende Reibung: $\mu = \frac{0,25}{d}$ [161/S.92]

Literatur: [161]Häsel, E.: Der Brückenbau – Ein Handbuch zum Gebrauche beim Entwerfen von Brücken in Eisen, Holz und Stein. 1.Teil: Die eisernen Brücken. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1908.

K4- 15: 1911 – SCHAPER

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Bei Auflagerdrücken über 12t aus ständiger Last Rollenlager empfohlen [238/S.420]

Literatur: [238]Schaper, G.: Eiserne Brücken. 2.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1911.

K4- 16: 1916 – RASCH

- Zielstellung: Der Reibungskoeffizient μ ist bislang weder bzgl. der begrifflichen und physikalischen Bedeutung, noch bzgl. der Abhängigkeit von den Auflagerkräften, Flächenpressungen und Materialeigenschaften der Berührungskörper erschöpfend erörtert worden [80/S.13]
Darlegung, dass Reibungskoeffizient μ physikalisch und begrifflich mit einfacher Bedeutung; Rollende Reibung durch Formänderungen und Materialbeanspruchungen an der Berührungsstelle zu erklären [80/S.13]
- Methode:
- Ergebnis: Reibungskoeffizient $\mu = \frac{M}{P} = b$ in [cm]; Für zylindrische Wälzflächen gilt nach einigen Umstellungen: $b = \mu = \frac{P}{2 \cdot p \cdot L}$ mit P= Auflagerkraft, L= Länge der Walzen, p= mittlere Flächenpressung; Im Umkehrschluss folgt:
$$p = \frac{P}{L} \cdot \frac{1}{2 \cdot \mu}$$
; aus dem Reibungskoeffizienten kann also die Materialbeanspruchung und aus der Belastung und Geometrie der Reibungskoeffizient abgeleitet werden [80/S.15]
Ergebnis angezweifelt, da nach Rasch unabhängig von Schmiermittel, etc. auch Widerspruch mit Hertz; Rasch's Diagramm in Übereinstimmung mit Werten nach Bleich in [128/S.570]
- Literatur: [80]Rasch, E.: Zur Theorie und Praxis der rollenden Reibung und der in Wälzlagern auftretenden Materialbeanspruchungen. Eisenbau 7 (1916), S.13-17.
[128]Bleich, Fr.: Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin: Springer, 1924.
-

K4- 17: 1922 – SCHAPER

- Zielstellung:
- Methode:
- Erkenntnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$;Wälzende Reibung: abhängig vom Rollendurchmesser, aber mittlerer Wert für alle Durchmesser empfohlen $\mu = 0,03$ [240/S.117]
Reibungswiderstände in der Regel nicht bei der Berechnung der Hauptträger, sondern nur bei der Berechnung hoher, schlanker Pfeiler berücksichtigt. [240/S.117]
- Literatur: [240]Schaper, G.: Eiserne Brücken. 5.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1922.
-

K4- 18: 1923 – DIN E 1072 - Entwurf

- Zielstellung:
- Methode:
- Ergebnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$
Rollende Reibung: $\mu = 0,03$ [411P.II.2.d]
- Literatur: [411]DIN E 1072: Strassenbrücken – Belastungsannahmen. In: Baunormung 2 (1923), S.29-31.
-

K4- 19: 1924 – BLEICH

Zielstellung:

Methode: Bezieht sich bei der rollenden Reibung auf die Versuche vom VDI (siehe K3- 3)

Ergebnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$ [128/S.567]

Rollende Reibung: Rollenlager empfohlen für Auflagerdruck $> 15t$ [128/S.570]

Als Reibungskoeffizient $\mu = 0,002 + 0,0178 \cdot \frac{P}{l}$ [128/S.570, dort mit Schreibfehler],

als Reibungswiderstand folgt $R = (0,002 + 0,0178 \frac{A}{l}) \cdot \frac{A}{d}$, jeweils mit Belastung in [t]

und Geometrie in [cm]; [128/S.570]

Damit größere Widerstände als bei älteren Regeln, z.B. $R = \frac{0,015 \cdot A}{d}$ [128/S.570]

Literatur: [128]Bleich, Fr.: Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin: Springer, 1924.

K4- 20: 1925 – BE-Vorschriften

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: „Die gleitende Reibung ist zu 0,2, die rollende Reibung zu 0,03 vom Auflagerdruck [...] anzunehmen“ [413/S.35]

Literatur: [413]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für eiserne Brücken (B.E.), 02/1925.

[507]Gehler, W.: Balkenbrücken. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1931.

K4- 21: 1931 – GEHLER

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung: Gleitlager nur als Notlösung bei eisernen Brücken kleiner Spannweite, nicht aber bei Brücken aus dem spröden Eisenbeton [507/S.172]

Reibungsfaktoren Stein auf Stein $\mu = 1,00$; Beton auf Eisen $\mu = 0,5$, Eisen auf Eisen

$\mu = 0,2$ [507/S.306]; Rollende Reibung: ab Spannweite $\geq 8 \dots 10$ m bei Eisenbetonbrücken

Rollenlager sinnvoll [507/S.171]; auf Grundlage eigener Versuche (siehe K3- 4) bei gut ausgebildeten Rollenlagern $\mu = 0,01 \dots 0,03$ [507/S.172]

Literatur: [507]Gehler, W.: Balkenbrücken. 3.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1931.

K4- 22: 1934 – SCHAPER

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$; Wälzende Reibung: zwar abhängig vom Rollendurchmesser, man rechnet aber mit $\mu = 0,03$ [242/S.24]

Reibungswiderstände in der Regel nicht bei der Berechnung der Hauptträger, sondern nur bei der Berechnung der Auflagerkonstruktionen berücksichtigt [242/S.24]

Literatur: [242]Schaper, G.: Feste stählerne Brücken. 6.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1934.

K4- 23: 1934 – BE-Vorschriften, 3.Aufl.

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$; Wälzende Reibung: $\mu = 0,03$ [422/§28]

Literatur: [422]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE), 3.Aufl., 02/1934

K4- 24: 1950 – „Hütte“ – des Ingenieurs Taschenbuch, 27.Aufl.

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende Reibung:
 $\mu = 0,22 \dots 0,25$ für Stahl/Stahl und $\mu = 0,15$ für Gusseisen/Gusseisen [637/S.397]

Literatur: [637]Hütte (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, 1.Bd. 27.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1950.

K4- 25: 1963 – Dv 804 – BE-Vorschriften

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$; Wälzende Reibung: $\mu = 0,03$ [439/P.12]

Literatur: [439]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Dv 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift) und Teil II (Tafeln), 02/1963. In: [670].

K4- 26: 1980 – DV 804 – BE-Vorschrift

Zielstellung:

Methode:

Erkenntnis: Gleitende Reibung: $\mu = 0,2$; Wälzende Reibung: $\mu = 0,03$ [444/P.12]

Literatur: [444]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Dienstvorschrift für die Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken (BE), 09/19.

K4- 27: 1984 – DIN 4141

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Bzgl. der Reibungsbeiwerte Verweis auf die einzelnen Lagerarten behandelten Normenblätter (neue Lagergeneration)

Angaben für den Nachweis der Gleitsicherheit: Gleitende Reibung:
 $f = 0,2$ für Reibung Stahl/Stahl,
 $f = 0,5$ für Beton/Beton und Stahl/Beton [373/Teil 1, S.5]

Literatur: [373]DIN 4141: Lager im Bauwesen. 09/1984

[557]Petersen, Chr.: Stahlbau. 2.Aufl. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 1990.

K4- 28: 1985 – DIN 1072

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Gleitende Reibung: Allgemein gelten für den Reibwiderstand die Angaben der Zulassungsbescheide bzw. der DIN 4141, mit Rücksicht auf inzwischen übliche neue Lagerarten keine pauschale Angabe von Zahlenwerten mehr [445/P.4.5]

Rollende Reibung: $\mu = 0,05$ [445/P.4.5]; bei Versuchen festgestellt, dass bisheriger Wert $\mu = 0,03$ wegen der auftretenden Verformungen nicht ausreicht [445/Beiblatt 1]

Literatur: [445]DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken. 12/1985.

K4- 29: 1995 – pr DIN EN 1337-4

Zielstellung:

Methode:

Ergebnis: Rollende Reibung:
Die für die Tragwerksbemessung zu berücksichtigende Reibungszahl bei Oberflächen mit Rollkontakt muss den verwendeten Werkstoffen entsprechen [377/S.12]

Literatur: [377]DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 4: Rollenlager, 08/

Katalog K5 – Versuche zu Ermüdung/Verschleiß

K5- 1: 1887 – WING

Problem:

Zielstellung: Bestimmung der Lebensdauer von Walzen aus verschiedenen Materialien und unter verschiedenen Lasten [17/S.102]

Methode: Platte zwischen Lagerwalzen hin und her bewegt, bis Abrieb an Oberfläche feststellbar, Hier Probleme bei der Beobachtung, Material: cast and wrought iron, steel, Länge der Walzen 1,5", Durchmesser variierten von 2" bis 4" [17/S.103]
unterschiedliche Testreihen mit von 100 000 bis 800000 Zyklen [17/S.103]

Erkenntnis: Abrieb, Rost- und Narbenbildung festgestellt, plastische Verformungen der Walzenenden sowie an den äußeren Begrenzungen der Walzflächen der Platten (Wallbildung)

Literatur: [17]Crandall, C.L.; Marston, A.: Friction Rollers. Transactions of the American Society of Civil Engineers 32 (1894), Aug., S.99-129, ergänzende Diskussion auf S.270-277.

K5- 2: um 1962 – Ausführender unbenannt

Problem: Eignung hochfester Brückenlager für Hängebrückensättel noch unklar [114/S.491]

Zielstellung: Nachweis der Dauerhaftigkeit [114/S.491]

Methode: Insgesamt 22 hochfeste Einrollenlager getestet durch Langzeitversuche (über 280.000 Bewegungszyklen) mit je 3 Bewegungen pro Minute unter 280 t Belastung [114/S.491]

Erkenntnis: Uneingeschränkte Eignung festgestellt, [114/S.491] (Beachte Werbecharakter! A.d.Verf.)

Literatur: [114]N.N.: Steel roller bearings for large bridges. Concrete and constructional engineering: including prestressed concrete 58 (1963), S.490-492.

K5- 3: 1965 – MILITARY ENGINEERING EXPERIMENTAL ESTABLISHMENT (MEXE)

Problem: BS 153 Part 3B § 30(b) begrenzt die zulässige Belastung gusseiserner Walzen (double or single roller) auf $zul_A = 0,7 \cdot D \cdot L$ (A in t, D und L in inch) [74/S.i]

Zielstellung: Prüfung, ob Erhöhung der zulässigen Spannungen möglich [74/S.i]

Methode: Getestet wurden: eine Walze – 7.14" lang, 10" Durchmesser sowie zwei Walzen – 7.14" lang und 6.65" Durchmesser,

Ansatz, dass Brückenlager pro Tag = 1 Lastwechsel auf Grund des Temperaturwechsels Tag/Nacht, also 365 Zyklen pro Jahr. Gewählt wurden 30 000 Testzyklen, entspricht 82 Einsatzjahre, durch Testmaschine in 6 Arbeitstagen gewährleistet [74/S.1] Vertikalbelastung bis zu 200 Tonnen [74/S.2]

Phase 1:

Last in 50 t Schritten bis zu 200 t, 1.5 h gehalten, damit bis zu 4-fache Last (d=10") bzw. 3-fache Last (d= 6.65") zulässig nach BS 153 aufgebracht; danach Lastzyklen gestartet. Nach 30 Zyklen Versagen Lagerplatte

Phase 2:

Lagerplatten abgehobelt, Walzen um 90° gedreht, um „frisches Fleisch“ zu gewährleisten, sukzessive Lasterhöhung auf bis zu 100 t, jetzt nur bis zu 2-fache Last (d=10") bzw. 1.5-fache Last (d=6.65") zulässig nach BS 153 aufgebracht; Lastzyklen gestartet und regelmäßige Messung der Verformungen

Erkenntnis: Verformungen der Lagerplatten generell viel geringer als die der Walzen; bezogen auf zulässige Last nach BS 153 folgt: bei 1,5-facher Last $zul_A = 1,05 \cdot D \cdot L$:

d=6.65": durchschn. Verformung max. 0,0025" (0,0064cm) nach 30 000 Lastzyklen

bei 2-facher Last $zul_A = 1,4 \cdot D \cdot L$: d=10": durchschn. Verformung max. 0,0054" (0,014cm) nach 30 000 Lastzyklen

bei 3-facher Last $zul_A = 2,1 \cdot D \cdot L$: d=6.65": durchschn. Verformung max. 0,0064" (0,016cm) nach nur 30 Lastzyklen

bei 4-facher Last $z_{ul} = A = 2,8 \cdot D \cdot L$; $d=10''$: durchschn. Verformung max. 0,018'' (0,046cm) nach nur 30 Lastzyklen [74/S.3]

Literatur: [74]MEXE Test Report No. 944: Tests on cylindrical roller bearings – BS 153. Military Engineering Experimental Establishment Christchurch, Nov. 1965.
[11]Black, W.: Notes on bridge bearings. RRL report 382 (1971).

K5- 4: 1995 – Schadens- und Sicherheitsanalyse an betriebsgeschädigten Stahlrollen von Brückenlagern

Problem: Schäden an durchvergüteten, hoch chromhaltigen („nichtrostenden“) Lagerrollen zu Beginn der 1970er Jahre [82/Vorwort]

Zielstellung: Klärung der Rissursachen, auch zur Klärung der Sicherheit noch im Einsatz befindlicher Rollen dieser Bauart [82/Vorwort]

Methode: Bruchmechanischer Ansatz [82/Kurzfassung]

Erkenntnis: Risse aller Wahrscheinlichkeit nach durch Zusammenwirken vergleichsweise großer Eigenspannungen mit oberflächennahen Risskeimen infolge ungenügender Materialstabilität an der Oberfläche

Literatur: [82]Schindler, H.J.; Morf, U.: Schadens- und Sicherheitsanalysen an betriebsgeschädigten Stahlrollen von Brückenlagern. In: Bundesamt für Strassenbau (Hrsg.): Forschungsauftrag 87/90 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung, 1995.

Katalog K6 – Bemessungsansätze zu Ermüdung/Verschleiß

Dem Verfasser sind keine Bemessungsansätze bekannt.

Katalog K7 – Vorschriften-, Normen- und Regelwerk – Brückenbau

K7- 1: 1866 – Technische Vereinbarungen des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen ueber den Bau und die Betriebseinrichtungen der Eisenbahn

Konstruktion:

Material: „Eiserne Brücken sind nur in begründeten Fällen den soliden gewölbten Konstruktionen aus Stein oder Ziegel vorzuziehen. Tragende Teile der Brückenbahn eiserner Brücken sind aus gewalztem oder geschmiedetem Material zu fertigen“ [380/S.3] (keine Angaben zu Lagern, A.d.Verf.)

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Literatur: [380]Technische Vereinbarungen des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen ueber den Bau und die Betriebseinrichtungen der Eisenbahn. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung 1 (1866), S.1-16.

K7- 2: 1878 – Vorschriften über Entwurf, Ausführung und Prüfung von Straßenbrücken mit eisernem Überbau betr.

Konstruktion:

Material: „Gusseisen für Lagerplatten und Stühle, mittels welchen die Träger auf dem Steinbaue ruhen. Das Gusseisen soll zähe, rein, feinkörnig und gleichmäßig dicht, ohne Blasen sein“ [381/S.48]

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Literatur: [381]Königreich Bayern (Hrsg.): Ministerialentschließung vom 13.Feb. 1878: Vorschriften über Entwurf, Ausführung und Prüfung von Straßenbrücken mit eisernem Überbau. Amtsblatt des k. Staatsministeriums des Innern (1878), Nr.7. In: [678].

K7- 3: 1885 – Besondere Bedingnisse für die Ausführung eiserner Brückenüberbauten (für Bayern, A.d.Verf.)

Konstruktion:

Material: „Alles Material muß von anerkannt verlässigen Hüttenwerken und in durchaus bester Beschaffenheit bezogen werden“ [382/§8, S.17]
„Die von Gusseisen herzustellenden Theile müssen von weichem Material, rein und scharf gegossen sein und dürfen weder Blasen noch Kaltgußstellen zeigen. Für die Stahltheile ist fehlerfreier Gussstahl zu verwenden“ [382/§8, S.18].

Bemessung:

Einbau: „Die Angebote haben die Preise [...] für die Herstellung der in den Auflagerquadern zu bohrenden Löcher zur Befestigung der Auflagerstühle zu enthalten“ [382/§2, S.3]

Wartung:

Prüfung „Von jeder Sorte der zur Ausführung bestimmten Materialien werden vor ihrer Verarbeitung einige Stücke durch die vorgegebene Stelle geprüft und wird bei nicht entsprechendem Befunde die ganze Sorte als vertragswidrig verworfen [...]“ [382/§8, S.18]

Literatur: [382]N.N.: Besondere Bedingnisse für die Ausführung eiserner Brückenüberbauten (für Bayern, A.d.Verf.). München, 1885. In: [676]

K7- 4: 1886 – Verbände deutscher Architekten- und Ingenieurvereine unter Mitwirkung des Vereins deutscher Ingenieure und des Vereins deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau

Konstruktion: Gleichmäßige Druckabgabe aus dem Überbau auf das Brückenlager und vom Brückenlager auf die Auflagerbank ist zu gewährleisten, z.B. durch Zwischenlagen aus Zement, Blei, o.ä. [383/§7, S.13]

Material: Regelung von Mindest-Materialanforderungen für Schweiß- und Gusseisen [383/§7, S.1]

Bemessung:

Einbau: Regelung der Haftung bzgl. Fertigstellung und Richtigkeit der Höhenlage der Auflagerquader als Voraussetzung für den korrekten und pünktlichen Einbau der Brückenlager [383/§7, S.13]

Wartung:

Prüfung: „Es muß möglich sein, mittels eines gegen eine rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schlages einen Eindruck zu erzielen, ohne dass die Kante abspringt. Ein unbearbeiteter quadratischer Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht“ [383/§2].

Literatur: [383]Verbände deutscher Architekten- und Ingenieurvereine unter Mitwirkung des Vereins deutscher Ingenieure und des Vereins deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau, 1886. In: [676]

K7- 5: 1888 – K:k: Statthalterei Baudepartment: Bedingungen für die Lieferung und Aufstellung von eisernen Brücken

Konstruktion: Gussplatten als Unterlage der Träger müssen an allen Berührungsflächen vollkommen eben gefertigt werden.
„Mit besonderer Sorgfalt ist bei komplizierten Auflagervorrichtungen, wie Scharnier-,Pendel-, Rollen- oder Keillager, vorzugehen. Bei solchen Lagern müssen alle Berührungsflächen genau gehobelt oder abgedreht werden“ [384/§4, S.7]
„Auflagerung des Überbaus bei Blechbrücken durch Zementmörtelschicht, bei Fachwerkbrücken durch Bleischicht“ [384/§10, S.21]

Material: „Sämtliche zu verwendende Materialien müssen von der besten Qualität sein“ [384/§3].
„Alles zur Verwendung kommende Gusseisen muss von grauem feinkörnigen und gleichartigem Bruche sein, mit dem Meißel und mit der Feile leicht bearbeitet und, wenn besondere Weichheit vorgeschrieben wird, auch mit dem Hammer gerichtet werden können. Der zur Verwendung kommende Stahl muß die für den Gebrauch der Konstruktiontheile in jedem einzelnen Falle erforderlichen Eigenschaften besitzen. Das zum Vergießen zu verwendene Blei muß gut gereinigt sein [...]“ [384/§4]
„Alle Gußeisenbestandtheile müssen vollkommen weich und scharf geformt sein, und dürfen keine Löcher, Blasen, Risse, (?) oder andere ihre Festigkeit oder ihr gutes Aussehen beeinträchtigende Mängel besitzen“ [384/§4.]

Bemessung:

Einbau: Die steinernen Auflagerbänke sind vor der Aufstellung des Überbaus bzgl. Richtung und Höhe zu prüfen [384/§10, S.21]

Wartung:

Püfung: „Die k:k: Statthalterei behält sich vor, nicht nur die Montierung am Bauplatze, sondern auch die Materialerzeugung und die Anfertigung der Brücken in der Eisenhütte und in den Werkstätten durch ihre Organe überwachen und die Güte des Materiales und der Arbeit durch Versuche erproben zu lassen. Der Unternehmer hat daher auch bei Bezug des Eisenmaterialies aus anderen als eigenen Hütten dem deligierten Vertreter der k:k: Statthalterei das Recht des freien Eintrittes, sowie ungehinderter Vornahme der Beaufsichtigung und Prüfung zu wahren(?)“ [384/§7,S.16]

Literatur: [384]K.k. Statthalterei Baudepartment: Bedingungen für die Lieferung und Aufstellung von eisernen Brücken. Innsbruck, 1888. In: [677]

K7- 6: 1891 – Preußische Staatseisenbahn (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen

Konstruktion:

Material: „Gussstücke sollen, wenn nicht Hartguss oder besondere Gattierungen ausdrücklich vorgeschrieben sind, aus grauem, weichem Eisen sauber und fehlerfrei hergestellt sein“ [387/§13], Zugfestigkeit von Flusseisen mindestens 12 kg/mm² [387/§15]

Bemessung:

Einbau: „Ausrichten und Einstellen der Auflager hat so zu erfolgen, dass die Druckabgabe auf das Auflager und weiter auf das Mauerwerk eine vollständig gleichmäßige ist. Dafür ist durch Einschlagen schlanker Keile ein Zwischenraum zwischen unterer Lagerplatte und der Auflagerbank zu erzeugen, welcher durch geeignetes Material vollständig auszufüllen ist. Nach dem Erhärten sind die Keile zu entfernen“ [387/§19]

Wartung:

Prüfung: Gusseisen:
“Ein quadratischer Stab (30 mm), auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen, muss eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können; es muss möglich sein, mittels eines gegen die rechtwinklige Kante des Gussstückes geführten Hammerschlages einen Eindruck zu erzielen, ohne dass die Kante abspringt“ [387/S.8]

Literatur: [387]Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 25.Nov. 1891: Besondere Vertragsbedingungen für Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen. In: Vereinigte Preußische und Hessische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Zusammenstellung allgemeiner Erlasse über eiserne Brücken und Dächer zum Dienstgebrauch. Berlin: H.S.Hermann, 1904. In: [676

K7- 7: 1892 – Schweizer Post- und Eisenbahndepartement (Hrsg.): Verordnung betreffend Berechnung und Prüfung der eisernen Brücken- und Dachkonstruktionen auf den schweizerischen Eisenbahnen

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Angaben von zulässigen Beanspruchungen auch für gusseiserne Bauteile [388/S.87]

Einbau:

Wartung:

Prüfung: „Die Güteproben des Constructionsmaterials eiserner Brücken und Dächer sind in der Regel durch die eidg. Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien auszuführen. Werden Versuche im Werke gemacht, so sind Controlproben in der genannten eidgenössischen Prüfanstalt anzustellen.

Die Ausführung der Güteproben hat nach folgenden Grundsätzen zu erfolgen:
a. Beim Schweisseisen...

b. Beim Flusseisen...

c. Beim Gusseisen durch Stichproben. Der Qualitätsausweis hat zu erfolgen an drei Musterbarren von 1,20 m Länge und 3,0 auf 3,0 cm Querschnitt, welche der Lieferant während des Abgusses der Gegenstände anzufertigen hat.

Hinsichtlich des Gussverfahrens der Versuchsbarren sind die bezüglichlichen Vorschriften der eidgenössischen Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien maßgebend. Die Güteproben des Constructionsmaterials umfassen:

[...] beim Gusseisen: Biegeversuche, Zerreißversuche“ [388/S.87]

“Beim Gusseisen dürfen die Zugfestigkeit β und die Biegearbeit A, letztere bei einer Freilage der Versuchsbarren von 1 m gemessen im Biegeungspfeil, nicht weniger als folgende Werte betragen: $\beta = 1,4$ t auf den cm², A = 0,50 t cm“ [388/S.88]

Literatur: [388]Schweizer Post- und Eisenbahndepartement (Hrsg.): Verordnung betreffend Berechnung und Prüfung der eisernen Brücken- und Dachkonstruktionen auf den schweizerischen Eisenbahnen. In: Schweizerische Bauzeitung 20 (1892), S.86-89.

K7- 8: 1892 – K.k. Handelsministerium: Bestimmungen für die Lieferung und Aufstellung eiserner Brücken

Konstruktion:	„Alle aus Gusseisen oder aus Flusstahl hergestellten Bestandteile sind rein auszuarbeiten. Besondere Sorgfalt ist auf die Ausführung der Auflager-Vorrichtungen zu verwenden. Bei den Lagern müssen alle Berührungsflächen von Eisen auf Eisen genau gehobelt, gefraist oder abgedreht werden und ist bei Stelzen- oder Rollenlagern genau zu beachten, dass die Stelzen und Rollen untereinander gleich hoch sind“ [386/§6],
Material:	„Für Brückenlager wird neben Schweißeisen oder basischem Martinflußeisen auch Gusseisen und Stahl verwendet; graues Gusseisen soll 1200 kg/cm ² Zugfestigkeit und 5000 kg/cm ² Druckfestigkeit haben. Martinflußstahl für Lagerteile mus 5700 kg/cm ² Zugfestigkeit bei 10% Dehnung aufweisen“; [386/§1], „Bestandteile aus Gusseisen müssen aus weichem grauen Roheisen rein und fehlerfrei hergestellt werden. Die Bestandteile aus Stahl sind rein und ohne Fehler herzustellen“ [386/§3]
Einbau:	Bei Stützweiten bis 25 m Lagerplatten mit Zementmörtelbett, bei größeren Spannweiten oder bei sofort mit Lokomotiven zu befahrenden Brücken ca 1 cm starke Bleiunterlage [386/§11]
Wartung:	
Prüfung:	„Gusseisen: Bei einem mit dem Setzhammer gegen eine rechtwinklige Kante des Gußstückes senkrecht auf die Kante geführten Schlage muß ein Eindruck erzielt werden können, ohne dass die Kante abspringt“ [386/§4]
Literatur:	[386]K.k. Handelsministerium (Hrsg.): Grundsätzliche Bestimmungen für die Lieferung und Aufstellung eiserner Brücken. Wien: Kaiserlich königliche Hof- und Staatsdruckerei, 1892.

K7- 9: 1893 – Verbände deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine, Verein deutscher Ingenieure, Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau

Konstruktion:	„Aufstellung der Brückenlager muss eine gleichmäßige Druckabgabe vom Überbau auf die Lager sowie von den Lagern auf die Auflagerbänke ermöglichen. Dafür ist zwischen unterer Lagerplatte und Widerlagerstein eine Zwischenlage aus Zement, Blei, o.ä. einzubringen“ [389/§9, S.367]
Material:	Regelung von Mindest-Materialanforderungen für Schweiß- und Gusseisen, gegenüber der Ausgabe von 1886 jetzt auch für Flusseisen und -stahl [389/S.364ff] „Die aus Flusstahl herzustellenden gegossenen oder geschmiedeten Theile (Auflagertheile oder dergl.) sollen eine Festigkeit von 45 bis 60 kg/mm ² und eine Dehnung von mindestens 10 % aufweisen“ [389/§3]
Einbau:	Regelung der Haftung bzgl. Fertigstellung und Richtigkeit der Höhenlage der Auflagerquader als Voraussetzung für den korrekten und pünktlichen Einbau der Brückenlager [389/§9]
Wartung:	
Prüfung:	Siehe 1. Auflage von 1886
Literatur:	[389]Verbände deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine, Verein deutscher Ingenieure, Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau. Hamburg: Meissner, 1893; auch: Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 37 (1893), S.364-368.

K7- 10: 1895 – Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 1.Okt. 1895 - Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau

Konstruktion: Keine Angaben zu Brückenlagern

Material

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [390]Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 1.Okt. 1895 - Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau. In: Centralblatt der Bauverwaltung 15 (1895), S. 485-488.

K7- 11: 1895 – Königl. Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Grundlagen für Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen

Konstruktion: Übertragung des Stützdruckes durch Quersteifigkeit des Endpfostens [391/S.26, P.34]
Übertragung des Stützdruckes auf das Lager soll so erfolgen, dass bleibende und elastische Formveränderungen des eisernen Überbaus möglichst ungehindert und ohne nennenswerte Nebenspannungen für den Überbau vor sich gehen können [391/S.26, P.32]
Die Oberfläche gusseiserner Lagerplatten ist daher in Längsrichtung immer gewölbt auszuführen, es sei denn, dass besondere Umstände die Anordnung einer Kugelfläche erfordern [391/S.26, P.33]
Zwischen Lagerplatte und Mauerwerk ist normalerweise eine 3mm starke Bleiplatte einzubauen, u.U. können ersatzweise auch Filz, Dachpappe oder Zement gefordert werden [391/S.26, P.36]
Art der Lagerung abhängig vom Auflagerdruck:
≤ 3,0t – gewöhnlich gewölbte Gussplatte
≤ 6,0t – gewölbte Gleitplatte, in [451/S.38] bis ≤ 8,0t
> 6,0t – Walzenstühle [391/S.26, P.39]; in [451/S.38] ab >8,0t;
Längenänderungen infolge Temperaturschwankungen sind möglichst ungehindert zu gewährleisten [391/S.27, P.37]
Anzahl der Walzen mindestens n=4, Über einen horizontalen Rahmen ist die Lage der Walzen zueinander zu sichern [391/S.28, P.41]

Material:

Bemessung: Die untere Lagerplatte ist so zu bemessen, dass der Druck auf das Mauerwerk nicht mehr als 2,0...3,0 t/dm² beträgt [391/S.27, P.35]
Für die Reibung gewöhnlicher und rollengelagerter Auflager ist der Koeffizient 0,25 anzusetzen, der bei der Berechnung wichtiger Überbauteile anzusetzen ist [391/S.27, P.37]
Bei Anordnung von Walzenstühlen mindestens 4 Walzen anwenden,
Grundfläche der Walzen entsprechend dem 20-fachen der reduzierten Auflagerkraft [391/S.28, P.40] (nach Umrechnung folgt: $n \cdot l \cdot r = 10 \cdot A$, vorausgesetzt, dass sich die Angaben der Vorschrift auf „cm“ beziehen; A.d.Verf.)

Einbau: Bei Brücken mit Gefälle sind am unteren Auflager feste Brückenlager einzubauen [391/S.26, P.42]

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [391]Königl. Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Grundlagen für Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen, 1895. In: [676/352/f].
[451]Ebert: Ueber zulässige Beanspruchungen von Eisenkonstruktionen. Deutsche Bauzeitung 30 (1896), S.13-15, 24-27, 35-38, 47-50

K7- 12: 1895 – Verbands deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, dem Vereine deutscher Ingenieure und dem Vereine deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- u. Hochbau

Konstruktion: Aufstellung der Brückenlager muss eine gleichmäßige Druckabgabe vom Überbau auf die Lager sowie von den Lagern auf die Auflagerbänke ermöglichen. Dafür ist zwischen unterer Lagerplatte und Widerlagerstein eine Zwischenlage aus Zement, Blei, o.ä. einzubringen [394/§9, S.12]

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [394]Verbands deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, dem Vereine deutscher Ingenieure und dem Vereine deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- u. Hochbau. 4.Aufl. Hamburg: Meissner,1895. In: [676/352/f/1-3

K7- 13: 1895 – Königlich Sächsische Staatseisenbahn (Hrsg.): Besondere Bedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen zu Brücken- und Hochbauten vom Jahre 1895

Konstruktion: Bei Lagern müssen sämtliche Flächen, welche in gegenseitige Berührung kommen, genau nach den Angaben der Zeichnung gehobelt oder abgedreht werden [392/P.5]

Material: „Die aus Flußstahl und Gußeisen herzustellenden gegossenen Teile müssen vollkommen blasenfrei sein“ [392/P.3].

Bemessung: Allgemeine Angaben für zulässige Spannungen, auch für Gusseisen und Gussstahl [392/S.5 (24)]

Einbau:

Wartung:

Prüfung: Die Staatseisenbahnverwaltung ist berechtigt, auch die Vornahme von Proben in Bezug auf die chemische Beschaffenheit der Materialien auf Kosten des Unternehmers zu beanspruchen [392/P.1].

(4) Die Staatseisenbahnverwaltung ist berechtigt, in besonderen Fällen nach ihrem Ermessen über die festgesetzte Anzahl Proben hinauszugehen, unter anderem auch Proben mit ganzen Stücken vorzunehmen, ohne dass dem Unternehmer Entschädigungsansprüche für solche Mehrproben zustehen [392/P.2]

(1) [...] Die Anzahl der zu entnehmenden Proben bleibt dem Ermessen der Staatseisenbahnverwaltung vorbehalten [392/P.3].

Literatur: [392]Königlich Sächsische Staatseisenbahn (Hrsg.): Besondere Bedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen zu Brücken- und Hochbauten vom Jahre 1895. In: [676]

K7- 14: 1895 – Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 19.März 1895 - Vorschriften für die Ueberwachung und Prüfung der Brücken mit eisernem Ueberbau im Bereiche der preußischen Staatseisenbahnverwaltung

Konstruktion:

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung: Bei den Jahresprüfungen ist festzustellen, ob die Auflager, namentlich die stählernen und gusseisernen Teile derselben, Brüche oder Sprünge zeigen, ob die Rollen- oder Pendelsätze richtig liegen und wirken, ob die Roll- oder Gleitflächen der Platten frei von Schmutz und Wasser sind und ob eine allseitige Berührung einerseits zwischen den Trägern und den Auf lagerteilen, andererseits zwischen den eigentlichen Lagerplatten und den Auflagersteinen stattfindet [393/§5, P.2]

Weiterhin ist der betriebsichere Zustand der Auflagersteine zu prüfen [393/§5, P.4]

Im Zuge der turnusmäßig wiederkehrenden Hauptprüfungen sind alle Lagerteile einer eingehenden Prüfung zu unterziehen [393/§11, P.2]

Sonstiges:

Literatur: [393]Preußische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 19.März 1895 - Vorschriften für die Ueberwachung und Prüfung der Brücken mit eisernem Ueberbau im Bereiche der preußischen Staatseisenbahnverwaltung. In: Centralblatt der Bauverwaltung 15 (1895), S.141-144.

Dazu ergänzend in

[455]Gehler: Die neuen Vorschriften für Eisenbahnbauwerke der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Bauingenieur 7 (1926), S.64-69.

[456]Hoffmann, P.: Bemerkungen zur Überwachung und Unterhaltung von eisernen Brücken und anderen Kunstbauten. Zentralblatt der Bauverwaltung 40 (1920), S.621-623.

[466]Neustätter, A.: Über das Brückenüberwachungs- und Unterhaltungswesen. Zentralblatt der Bauverwaltung 41 (1921),

K7- 15: 1896 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn – Eisenbahndirektion Mainz (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen

Konstruktion:

Material: „Die Gußstücke sollen, wenn nicht Hartguß oder besondere Gattierungen ausdrücklich vorgeschrieben sind, aus grauem, weichem Eisen sauber u. fehlerfrei hergestellt sein“ [395/§13]
Gusseisen: Zugfestigkeit mind. 12 kg/mm² [395/§14, S.8]

Bemessung:

Einbau: Einbau und Einstellen aller Auflager hat so zu erfolgen, dass eine gleichmäßige Druckabgabe auf das Auflager und von diesem auf das Mauerwerk erfolgt. Dafür ist durch Einschlagen schlanker Keile ein Zwischenraum zwischen unterer Lagerplatte und der Auflagerbank zu erzeugen, welcher durch geeignetes Material vollständig auszufüllen ist. Nach dem Erhärten sind die Keile zu entfernen [395/§19].

Wartung:

Prüfung:

Gusseisen:

“Ein [...]quadratischer Stab (30 mm), auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen, muss eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können [...]. Es muss möglich sein, mittels eines gegen die rechtwinklige Kante des Gußstückes geführten Hammerschlages einen Eindruck zu erzielen, ohne dass die Kante abspringt“; [395/§14]

Literatur:

[395]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn – Eisenbahndirektion Mainz (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Lieferung und Aufstellung von größeren zusammengesetzten Eisenkonstruktionen, (verm. um 1896, A.d.Verf.). In: [676]

K7- 16: 1899 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für die Berechnung der eisernen Brücken der Preußischen Staatseisenbahn-Verwaltung

Konstruktion: Keine Anmerkungen zu den Brückenlagern

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [396]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für die Berechnung der eisernen Brücken der Preußischen Staatseisenbahn-Verwaltung. Berlin: Ernst & Sohn, 1899.

K7- 17: 1900 – Königlich Bayerische Staats-Eisenbahn (Hrsg.): Grundlagen für die Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen (In vorläufiger Fassung), 1900

Konstruktion: Lagerung des Überbaus muss dessen Durchbiegung ohne Erzeugung von Nebenspannungen ermöglichen [397/S.26,P.35],
dazu Wölbung geeigneter Auflagerteile in Längs- und ggf. auch in Querrichtung vorsehen [397/S.27,P.36],
Zwischen Lagerplatte und Mauerwerk 3mm Bleiplatte o.ä. zur gleichmäßigen Lastverteilung üblich [397/S.27,P.38]
Längenänderungen des Überbaus infolge Temperaturschwankungen oder Verkehrsbelastungen sind durch Anordnung beweglicher Lager zu gewährleisten [397/S.26,P.39],
Art der Lagerung abhängig vom Auflagerdruck:
≤ 10,0t – gewöhnlich gewölbte Gußplatte
> 10,0t – Walzenstühle [397/S.26,P.40f]
Anzahl der Walzen mindestens n=4; über einen horizontalen Rahmen ist die Lage der Walzen zueinander zu sichern [397/S.26,P.42],
Gestaltung und Befestigung nach den einschlägigen Normalplänen siehe [363], [397/S.26,P.44],

Material:

Bemessung: Reibung (Gleit- oder Rollreibung) ist mit ¼ des Stützdruckes zu berücksichtigen;
Grundplatte des Lagers ist so zu bemessen, dass die zulässige Belastung des Mauerwerks nicht überschritten wird; [397/S.26,P.37]
Grundfläche der Walzen entsprechend dem 20-fachen der reduzierten Auflagerkraft [397/S.26,P.42], (nach Umrechnung folgt: $n \cdot l \cdot r = 10 \cdot A$, vorausgesetzt, dass sich die Angaben der Vorschrift auf „cm“ beziehen, A.d.Verf.)

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [397]Königlich Bayerische Staats-Eisenbahn (Hrsg.): Grundlagen für die Herstellung eiserner Brücken- und Hochbaukonstruktionen (In vorläufiger Fassung), 1900. In: [676]

K7- 18: 1903 – Großh. Badische Staatsbahn-Verwaltung (Hrsg.): Vorschriften für die Anordnung und Berechnung eiserner Brücken der Großh. Badischen Staatsbahn-Verwaltung

Konstruktion:	Ab 20 m Stützweite Anordnung von Rollen- oder Pendellagern [398/S.1]
Material:	
Bemessung:	Angaben zur Bemessung der Unterlagsplatten in Abhängigkeit von der Stützweite und der Qualität des Materials der Auflagerquader in [398/S.10] Max_σ für gusseiserne Unterlagsplatten 700 kg/cm ² [398/S.10], Angaben zur Bemessung des Kippzapfens in Abhängigkeit des Materials der angrenzenden Lagerkörper in [398/S.11]
Einbau:	
Wartung:	Konstruktive Durchbildung so, dass Wassersäcke an den Auflagern vermieden werden, [398/S.1]
Sonstiges:	
Literatur:	[398]Großh. Badische Staatsbahn-Verwaltung (Hrsg.): Vorschriften für die Anordnung und Berechnung eiserner Brücken der Großh. Badischen Staatsbahn-Verwaltung, 1903. In: [676]

K7- 19: 1903 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den Preußischen Staatseisenbahnen

Konstruktion:	Angaben nach dem Erlaß des Ministers für öffentliche Arbeiten vom 15. November 1894 – I.12757; vgl. K8 - 1
Material:	
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Sonstiges:	
Literatur:	[399]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den Preußischen Staatseisenbahnen. Berlin: Ernst & Sohn, 1903. [400]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Erlaß vom 1.Mai 1903 – Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau. In: Zentralblatt der Bauverwaltung 23 (1903), S. 301-305.

K7- 20: 1904 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Zusammenstellung allgemeiner Erlasse über eiserne Brücken und Dächer zum Dienstgebrauch

Konstruktion:	Verweis auf Erlass des Ministers für öffentliche Arbeiten vom 15. November 1894 – I.12757;
Material:	vgl. K8 - 1
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Sonstiges:	
Literatur:	[401]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Zusammenstellung allgemeiner Erlasse über eiserne Brücken und Dächer zum Dienstgebrauch. Berlin: Druckerei S.Hermann, 1904.

Konstruktion:	<p>Gleichmäßige Druckabgabe aus dem Überbau auf das Brückenlager und vom Brückenlager auf die Auflagerbank ist zu gewährleisten, z.B. durch Zwischenlagen aus Zement, Blei, o.ä.; bei Anwendung von Zement ist dieser nicht zu untergießen, sondern zu unterstopfen [402/§8]</p> <p>Sämtliche Flächen, welche sich berühren, sind zu hobeln. Lagerrollen und Stelzen sind genau abzdrehen; ebenso sind Zapfengelenke u. dgl. sorgfältig abzdrehen, in die Lager genau einzupassen und einzuschmirmgeln.</p>
Material:	<p>Die aus Gusseisen bestehenden Teile müssen, wenn nicht Hartguss oder andere Gusseisensorten ausdrücklich vorgeschrieben sind, aus grauem, weichem Eisen sauber und fehlerfrei hergestellt sein. ... Die Zugfestigkeit soll mindestens 12 kg/mm² betragen.</p> <p>Stahlteile mit komplizierten Formen, wie Kippplatten, Rollplatten und Grundplatten von Auflagern u. dgl. sind in feuerfesten Formen zu gießen. Stahlteile mit einfachen Formen, wie Zapfengelenke, Rollen, Scharnierbolzen, Lagerstelzen, Keile u. dgl. sind aus Flusstahl zu schmieden.</p> <p>Die Zugfestigkeit von Stahlgussstücken muß mindestens 45 kg/mm², die Dehnung 12% betragen [402/S.32].</p> <p>Die Zugfestigkeit geschmiedeter Stahlteile soll mindestens 54 kg/mm² bei 12 % Dehnung betragen [402/S.33].</p>
Bemessung:	
Einbau:	<p>Die gemauerten Auflagerbänke werden für die Aufstellung des Überbaus höhen- und achsengenau übergeben [402/§8],</p> <p>Lagerteile und Stelzen sind der herrschenden Umgebungstemperatur entsprechend zu justieren [402/§8].</p>
Wartung:	
Prüfung:	<p>Die Prüfung der Gusseisenteile beschränkt sich im allgemeinen auf die äußere Besichtigung und auf die Kontrolle der Maße. Es ist jedoch vorbehalten, auch Zerreiß-, Schlag- und Biegeproben anzustellen. Zu letzterem Zwecke sind auf Verlangen gleichzeitig mit den Gebrauchsstücken 3 Musterbarren von je 1,20 m Länge und 30/30 mm Querschnitt zu gießen [...] Es muss möglich sein, mittels eines gegen die rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schlages einen Eindruck zu erzielen, ohne dass die Kante abspringt. Ein unbearbeiteter quadratischer Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muß eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Belastung in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht.</p> <p>Die Stahlteile werden auf Richtigkeit der Maße und auf äußere Fehler untersucht; auch sind mit dem Material Zerreißversuche anzustellen.</p> <p>Für Stahlgussstücke wird bestimmt: Die Stücke müssen sauber und gleichmäßig dicht gegossen sein und gleichmäßigen Bruch zeigen;</p> <p>b) gleichzeitig mit dem Guss der betreffenden Stücke sind an einigen derselben Probestücke anzugießen, deren Güte durch Bestimmung der Zugfestigkeit und Dehnung zu erproben ist. Die hierbei erzielten Ergebnisse sind für die Beurteilung des Stahls der Gebrauchsstücke maßgebend [402/S.32].</p> <p>Für geschmiedete Stahlteile wird bestimmt:</p> <p>a) Die Proben werden einem überzähligen Gebrauchsstück entnommen.</p> <p>Sowohl bei Stahlguss als auch bei geschmiedetem Stahl darf ein nachträgliches Ausschmieden der Probestäbe nicht stattfinden [402/S.33].</p> <p>Die Prüfung hinsichtlich der inneren Güte des Materials findet ausschließlich auf den Hüttenwerken und in den Werkstätten des Unternehmers statt. Bei der Aufstellung kann eine Zurückweisung nur wegen äußerer Fehler, die hier erst bemerkt werden, erfolgen [402/S.35].</p> <p>Nach Vollendung der Eisenkonstruktion als Teil der allgemeinen Untersuchung:</p> <p>...</p> <p>g) Beschaffenheit und Wirkungsweise der Auflager [402/S.38].</p>
Literatur:	<p>[402]K.Württ. Staatseisenbahnen (Hrsg.): Besondere Bedingungen für die Anfertigung und Aufstellung von Eisenkonstruktionen zum Brücken- und Hochbau, 1904. In: [677]</p>

K7- 22: 1908 – Königlich Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Ausführung eiserner Brücken- u. Hochbaukonstruktionen

Konstruktion:	<p>Lagerung des Überbaus muss dessen Durchbiegung ohne Erzeugung von Nebenspannungen ermöglichen; dazu Wölbung geeigneter Auflagerteile in Längs- und ggf. auch in Querrichtung vorsehen [403/§13]</p> <p>Zwischen Lagerplatte und Mauerwerk ist 3mm Bleiplatte o.ä. zur gleichmäßigen Lastverteilung einzufügen [403/§13]</p> <p>Längenänderungen des Überbaus infolge Temperaturschwankungen oder Verkehrsbelastungen sind durch Anordnung beweglicher Lager zu gewährleisten [403/§13],</p> <p>Art der Lagerung abhängig vom Auflagerdruck:</p> <p>≤ 15,0t – gewöhnlich gewölbte Gussplatte</p> <p>> 15,0t – Walzenstühle [403/§13]</p> <p>Anzahl der Walzen mindesten n=4, Über einen horizontalen Rahmen ist die Lage der Walzen zueinander zu sichern [403/§13]</p> <p>Gestaltung und Befestigung nach den einschlägigen Normalplänen, siehe [363], [403/§13]</p>
Material:	<p>Für die Güte der Materialien Verweis auf die siebente veränderte Ausgabe der „Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbau“ von 1902.</p> <p>Die aus Flusstahl herzustellenden gegossenen oder geschmiedeten Teile (Auflagerteile oder dgl.) müssen eine Festigkeit von 45-60 kg/mm² und eine Dehnung von mindestens 10% aufweisen.</p> <p>Die aus Gusseisen bestehenden Teile müssen, wenn nicht Hartguß oder andere Gußeisensorten ausdrücklich vorgeschrieben sind, aus grauem, weichem Eisen sauber und fehlerfrei gegossen sein. ... Die Zugfestigkeit soll mindestens 12 kg/mm² betragen [403/§7]</p>
Bemessung:	<p>Reibung (Gleit- oder Rollreibung) ist mit ¼ des Stützdruckes zu berücksichtigen [403/§11]</p> <p>Die untere Lagerplatte ist so zu bemessen, dass der Druck auf das Mauerwerk in Abhängigkeit von der Spannweite und Qualität des verwendeten Materials nicht mehr als 2,0...6,0 t/dm² beträgt [403/§13]</p> <p>Bei Anordnung von Walzenstühlen mindestens 4 Walzen anwenden,</p> <p>Grundfläche der Walzen entsprechend dem 20-fachen der reduzierten Auflagerkraft,</p> <p>[403/§13] (nach Umrechnung folgt: $n \cdot l \cdot r = 10 \cdot A$, vorausgesetzt, dass sich die Angaben der Vorschrift auf „cm“ beziehen, A.d.Verf.)</p>
Einbau:	<p>Die beweglichen Auflagerstühle sind, unter Berücksichtigung der beim Freihängen des eisernen Überbaus vorhandenen Luftwärme, derart zu richten, dass sie bei einer Luftwärme von 10°C normale Stellung aufweisen. Zu diesem Zweck ist das Stuhlmittel auf beiden Seiten der oberen und unteren Rollstuhlplatten und der Walzenrahmen bzw. der Schleifplatte durch einen lotrecht verlaufenden Meißelhub deutlich kenntlich zu machen [403/§9].</p>
Wartung:	
Prüfung:	<p>Gusseisen:</p> <p>Es muss möglich sein, mittels eines gegen eine rechtwinklige Kante des Gußstückes mit dem Hammer geführten Schlages einen Eindruck zu erzielen, ohne dass die Kante abspringt. Ein unbearbeiteter Stab von 30 mm Seite, auf zwei 1 m voneinander entfernten Stützen liegend, muss eine allmählich bis zu 450 kg zunehmende Einzellast in der Mitte aufnehmen können, bevor er bricht [403/§7].</p>
Literatur:	<p>[403]Königlich Bayrische Staatseisenbahnen (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Ausführung eiserner Brücken- u. Hochbaukonstruktionen. München: Hafner, 1908.</p>

K7- 23: 1912 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Anlieferung und Aufstellung von Eisenbauwerken

Konstruktion:	Alle Auflager ... sind so auszurichten und einzustellen, dass der Druck sich auf das Auflager und von diesem auf das Mauerwerk möglichst gleichmäßig verteilt. Um das zu erreichen, ist zwischen der Grundplatte und den Auflagersteinen durch Eintreiben von schlanken Keilen eine Fuge von mindestens 15 mm Dicke herzustellen und durch den Füllstoff zu schließen. Nach dem Erhärten dieses Stoffes müssen die Keile entfernt und die von ihm herrührenden Höhlungen nachträglich mit demselben Füllstoff ausgefüllt werden [405/§22].
Material:	Die Zugfestigkeit von gegossenem Flusstahl soll 45 bis 60 kg/mm ² bei mindestens 10% Bruchdehnung betragen [405/§17]
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Prüfung:	Vor der Zusammensetzung der einzelnen Bauteile müssen die Bauwerkseisen und Gußstücke durch einen Beamten der Eisenbahnverwaltung auf ihre Abmessungen und Güte geprüft und abgenommen sein. [405/§11] Für die Biegeproben von Gusseisen muss der Probestab unbearbeitet und aus dem Abstich hergestellt sein, der zur Anfertigung der Gußstücke verwendet ist. Er muss bei einem Kreisquerschnitt von 30 mm Durchmesser und 650 mm Länge auf zwei 600 mm voneinander entfernten Stützen liegend, in der Mitte eine allmählich bis auf 460 kg zunehmende Belastung ertragen, bevor er bricht. Die Durchbiegung darf hierbei nicht weniger als 6 mm betragen [405/§17].
Literatur:	[405]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn: Besondere Vertragsbedingungen für die Anfertigung, Anlieferung und Aufstellung von Eisenbauwerken. Berlin: Ernst & Sohn, 1912.

K7- 24: 1912 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den preußischen Staatseisenbahnen. 5.Aufl.

Konstruktion:	Angaben nach dem Erlass des Ministers für öffentliche Arbeiten vom 15. November 1894 – I.12757; vgl. K8 - 1
Material:	
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Sonstiges:	
Literatur:	[406]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den preußischen Staatseisenbahnen. 5.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1912.

K7- 25: 1913 – Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den preußischen Staatseisenbahnen

Konstruktion:	Angaben nach dem Erlass des Ministers für öffentliche Arbeiten vom 15. November 1894 – I.12757; vgl. K8 - 1
Material:	
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Sonstiges:	
Literatur:	[407]Vereinigte Preußische und Hessische Staatsbahn (Hrsg.): Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit eisernem Überbau auf den preußischen Staatseisenbahnen. 6.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1913.

K7- 26: 1921 – DIN 1000: Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenbauwerken, 1921

Konstruktion:	Eine gleichmäßige Druckabgabe auf den Unterbau ist durch geeignete Zwischenlagen aus Zement, Blei o.ä. zu gewährleisten [408/§9]
Material:	Gusseisen: wenn nicht Hartguss o.ä. vorgeschrieben, aus grauem, weichem Eisen, sauber und fehlerfrei vergossen und zur möglichsten Vermeidung von Spannungen langsam abgekühlt., Gusseisen soll zähe und weich und mittels Feile und Meißel bearbeitbar sein [408/§4] Stahlformguss: Gussstücke dürfen keine Fehler haben, die der Verwendung entgegenstehen, Abgüsse müssen zweckentsprechend ausgeglüht werden [408/§3] Schmiedestahl: muss gleichmäßig und frei von Schlacken, Blasen, Rissen und sonstigen Fehlern sein [408/§3]
Bemessung:	
Einbau:	Walzen und Stelzen sind so zu justieren, dass bei einer Umgebungstemperatur von 10°C das Lager die Mittelstellung einnimmt [408/§9]
Wartung:	
Prüfung:	Gusseisen: Für die Biegeproben von Gusseisen muss der Probestab unbearbeitet und aus dem Abstich hergestellt sein, der zur Anfertigung der Gußstücke verwendet ist. Er muss bei einem Kreisquerschnitt von 30 mm Durchmesser und 650 mm Länge auf zwei 600 mm voneinander entfernten Stützen liegend, in der Mitte eine allmählich bis auf 460 kg zunehmende Belastung ertragen, bevor er bricht. Die Durchbiegung darf hierbei nicht weniger als 6 mm betragen [408/§4]. Stahlformguss: Probestücke sind gemeinsam mit dem Gussstück herzustellen und nachzubehandeln, Zugfestigkeit soll 50...60 kg/mm ² bei mindestens 10% Dehnung betragen [408/§3] Schmiedestahl: Zugfestigkeit zwischen 50...60 kg/mm ² bei mindestens 18% Dehnung
Literatur:	[408] DIN 1000: Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenbauwerken, 1921. In: [568/S.9-23].

K7- 27: 1922 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Vorschriften für Eisenbauwerke – Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken (vorläufige Fassung)

Konstruktion:	
Material:	
Bemessung:	Reibungswiderstände: gleitende = 0,2, rollende = 0,03 vom Auflagerdruck [409/S.28]; Festlegung von zulässigen Spannungen in Lagerteilen sowie von zulässigen Hertz'schen Spannungen für Gusseisen = 4,0 t/cm ² ; Flusseisen= 5,0 t/cm ² ; Stahlformguss= 6,5 t/cm ² ; Schmiedestahl= 7,5 t/cm ² , bei bestehenden Brücken Erhöhung um 25% erlaubt [409/S.38]; Sowie Festlegung von zulässigen Spannungen von Auflagersteinen und Mauerwerk der Pfeiler und Widerlager [409/S.39]
Einbau:	
Wartung:	
Sonstiges:	
Literatur:	[409]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Vorschriften für Eisenbauwerke – Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken (vorläufige Fassung), 1.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1922. [450]Bohny: Die neuen Vorschriften der Reichsbahn für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken. Zentralblatt der Bauverwaltung 42 (1922), S.306-310, 320-323. [476]Schaechterle: Vorschriften der deutschen Reichsbahn für Eisenbauwerke. Bautechnik 1 (1923), S.29-32, 36-38 [462]Kollmar, A.; Jacoby, K.: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) – Neuerungen der Ausgabe 1951. Stahlbau 23 (1954), S.3-15. (mit historischer Einordnung, A.d.Verf.)

K7- 28: 1923 – Erlaß des Reichsverkehrsministers, betr. „Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken“, 21.August 1923

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Festlegung von zulässigen Hertz'schen Spannungen für Gusseisen = 5,0 t/cm²; Flusseisen= 6,5 t/cm²; Stahlformguss= 8,5 t/cm²; Schmiedestahl= 9,5 t/cm² sowie Festlegung von zulässigen Spannungen von Auflagersteinen und Mauerwerk der Pfeiler und Widerlager [410]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [410]Erlaß des Reichsverkehrsministers, betr. „Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken“, 21.August 1923, Hier: zulässige Druckspannungen für Berührungsflächen. Bautechnik 1 (1923), S.363.

K7- 29: 1923 – DIN E 1072: Straßenbrücken – Belastungsannahmen

Konstruktion:

Material:

Bemessung: In Anlehnung an die Reichsbahnvorschriften Reibungswiderstände für gleitende Reibung $\mu=0,2$; rollende Reibung $\mu=0,03$ [410/S.31]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [410]Erlaß des Reichsverkehrsministers, betr. „Grundlagen für das Entwerfen und Berechnen eiserner Eisenbahnbrücken“, 21.August 1923, Hier: zulässige Druckspannungen für Berührungsflächen. Bautechnik 1 (1923), S.363.
[453]Ellerbeck: Normen für Straßenbrücken – Belastungsannahmen. Bautechnik 1 (1923), S.313.

K7- 30: 1925 – Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für eiserne Brücken (B.E.), 02/1925

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Erhöhung der zulässigen Spannungen bei Lagerteilen [459/S.22], teilweise beträchtliche Erhöhung, auch kritisiert in [455/S.67]
Gusseisen Ge 15.90: 6000 kg/cm²; Flusstahl St 37: 8000 kg/cm²
Stahlguss Stg 52.81, St 48: 10000 kg/cm²; Schmiedestahl StC 35.61: 12000 kg/cm² [413/Tafel 19]

Reibungszahlen von Lagerteilen neu aufgenommen, bei der Berechnung von Lagerteilen ist nur das Maximum von Fliehkraft, Seitenstoß und Wind anzusetzen [454/S.204]; Festlegungen für die Verteilung der Bremskräfte auf feste bzw. bewegliche Lager [454/S.205]

Reibungswiderstände beweglicher Lager sind i.d.R. nur bei der Bemessung der Lager und des Unterbaus, nicht aber für die Berechnung des Überbaus zu berücksichtigen [478]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges: Neu hinzugekommen ein Anhang:
„Besondere Bestimmungen für das Nachrechnen und für die Verstärkung eiserner Brücken“:
Danach können bei Lagern für den Betrieb gefährliche Schäden abgewartet werden und

Auflagersteine sind nur bei bedenklichen Schäden auszuwechseln [478]

Um auch die Einheitlichkeit äußerlich zu betonen, erschienen an ein und demselben Tage, am 25.2.1925, diese „Vorschriften“ der Reichsbahn und die sachlich mit ihnen fast vollständig übereinstimmenden „Hochbaubestimmungen für Eisenbauten“ (...) für den gesamten Bereich der Baupolizei Preußens, die voraussichtlich in den meisten übrigen deutschen Gliedstaaten übernommen werden dürften [455 /S.69]

Literatur: [413]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für eiserne Brücken (B.E.), 02/1925.
[455]Gehler: Die neuen Vorschriften für Eisenbahnbauwerke der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Bauingenieur 7 (1926), S.64-69.
[478]Sonntag, R.: Die neuen Vorschriften für Eisenbauwerke der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Zentralblatt der Bauverwaltung 45 (1925), S.321-352.

K7- 31: 1925 – Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 09/1925

Konstruktion: Ausführung grundsätzlich als Kipplager, bei breiten Brücken auch in Querrichtung [414/S.17]; Gleitlager bis 12 t Auflagerdruck bzw. bis 12 m Spannweite [414/S.17]
Rollenlager mit Vorzug gegenüber Stelzenlager, stets gerade Anzahl Rollen verwenden [414/S.17]; Rollen und Stelzen mit Einrichtung zur sicheren Führung [414/S.17]
Einfache gedrungene Formen verwenden, Wassersäcke vermeiden [414/S.17]

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung: Bequeme Zugänglichkeit ist zu gewährleisten [414/S.18]

Sonstiges:

Literatur: [414]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 09/1925. Berlin: Ernst & Sohn, 1925.
[479]Sonntag, R.: Grundsätze für die bauliche Durchbildung eiserner Eisenbahnbrücken der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Zentralblatt der Bauverwaltung 46 (1926), S.18-20.

K7- 32: 1926 – Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der Brücken, Hallen und Dächer (B.Ü.P.)

Konstruktion:

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges: Abstände der Brückenprüfungen: Einfache Prüfung: alle zwei Jahre, Hauptprüfung: alle sechs Jahre, bei schwachen/gefährdeten Brücken auch kürzer [415/S.7f]
Bei einfachen Prüfungen: Prüfen, ob Lager Schäden zeigen, ob Rollen oder Pendel richtig stehen u. wirken, ob Lager bei der Überfahrt hämmern und evtl. vorhandene Verankerungen in Ordnung sind [415/S.10]
Bzgl. des Unterbau ist zu prüfen, ob das Mauerwerk der Widerlager bzw. der Pfeiler und die Auflagersteine unbeschädigt sind bzw. Widerlager oder Pfeiler ausgewichen sind oder sich gesetzt haben [415/S.12]
Bei Hauptprüfungen: Bzgl. der Lager wie bei einfachen Prüfungen [415/S.14]

Literatur: [415]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Vorschriften für die Überwachung und Prüfung der Brücken, Hallen und Dächer (B.Ü.P.), 01/1926. Köln: DuMont, 1926.

K7- 33: 1929 – Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (A St Bau)

Konstruktion:

Material:

Bemessung:

Einbau: Vor dem Einbau Kontrolle des Zustands und der Geometrie der einzelnen Lagerteile, größte Sorgfalt beim temperaturgerechten Einstellen der Lager [418/S.14]
Unterscheidung zwischen Kugelkipplagern und Zylinderkipplagern bzgl. des erforderlichen Einbaus, um sattes Anliegen aller Lagerteile zu gewährleisten:
Kugelkipplager: auf Hartbleiunterlage
Zylinderkipplager: justieren durch Keile und nachträgliches sattes Unterstopfen [418/S.14]
Der Bauaufsichtsbeamte hat nach der Bauabnahme die entwurfs- und bedingungsgemäße Auflagerung sowie die Funktionstüchtigkeit der Brückenlager zu bescheinigen [418/S.16]

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [418]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (A St Bau). Berlin: Ernst & Sohn, 1929. In: [676/352/f].

K7- 34: 1930 – DIN 1076: Richtlinien für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken, 08/1930

Konstruktion:

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung: Einfache Prüfungen und Hauptprüfungen:
Prüfung der Lager auf Schäden, fehlerhafte Stellung, Lagersenkung, „Hämmern“ bei Zugüberfahrt [419/II, §6]

Sonstiges:

Literatur: [419]DIN 1076: Richtlinien für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken, 08/1930. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949

K7- 35: 1931 – Deutsche Reichsbahngesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 2.Aufl., 01/1931

Konstruktion: Keine wesentlichen Veränderungen gegenüber der 1.Auflage – vgl. K7- 31, nun aber schon ab 10 m Walzen- bzw. Stelzenlager empfohlen [420/S.12]

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [420]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 2.Aufl., 01/1931.

K7- 36: 1931 – DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken (Belastungsannahmen siehe DIN 1072), 2.Ausg.

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Angabe der zulässigen Spannungen in Lagern und Gelenken bei Beanspruchung auf Biegung und Druck sowie Angabe der zulässigen Hertz'schen Spannungen bei Punkt- oder Linienberührung, dabei Unterscheidung nach Lastfällen [in kg/cm²]
Bei mehr als 2 Rollen u.U. Reduzierung vorgesehen [420/§16],
Darüber hinaus auch Angabe der zulässigen Spannungen für Auflagersteine in [421/§17],

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [420]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 2.Aufl., 01/1931.
[421]DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken (Belastungsannahmen siehe DIN 1072), 2.Ausg., 09/1931. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949, S.72-96.

K7- 37: 1934 – Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE), 3.Aufl., 02/1934

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Berücksichtigung der Bremskräfte [422/§26], einer Stoßzahl [422/§27] sowie der waagerechten Verschiebung der beweglichen Lagerteile [422/§53] bei der Bemessung der Lager;
Als Reibungswiderstände gelten: Gleitende Reibung $\mu=0,2$, Rollende Reibung $\mu=0,03$,
Reibungswiderstände sind i.d.R. nur bei der Berechnung der Lager und des Unterbaus zu berücksichtigen [422/§28]
Angabe der zulässigen Spannungen in Lagern und Gelenken bei Beanspruchung auf Biegung und Druck sowie Angabe der zulässigen Hertz'schen Spannungen bei Punkt- oder Linienberührung, dabei Unterscheidung nach Lastfällen [in kg/cm²],
Bei mehr als 2 Rollen u.U. Reduzierung vorgesehen [422/§62]
Darüber hinaus auch Angabe der zulässigen Spannungen für Auflagersteine in [422/§64],

Einbau:

Wartung:

Sonstiges: Besondere Bestimmungen für das Nachrechnen bestehender stählerner Brücken:
„Die Werte der Tafel 23 für die zulässigen Spannungen der Lagerteile und der zulässige Lochleibungsdruck von Gelenkbolzen können bei bestehenden Brücken um 10%, die zulässigen Druckspannungen für die Berührungsflächen solcher Lager, die sich im unbelasteten Zustande nur in einer Linie oder einem Punkte berühren, um 25% erhöht werden. Im übrigen sind die Lager bestehender Brücken nur dann auszuwechseln, wenn sie für den Betrieb gefährliche Schäden haben“ [422/§72,P.22].
„Bei bestehenden Brücken können die in §64 angegebenen zulässigen Spannungen von Auflagersteinen usw. um 10% erhöht werden. Auflagersteine brauchen auch bei Überschreitung dieser Grenze nur ausgewechselt zu werden, wenn sie bedenkliche Schäden aufweisen“ [422/§72,P.23].

Literatur: [422]Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE), 3.Aufl., 02/1934. In: [676/352/f].

K7- 38: 1937 – DIN 1050: Berechnungsgrundlagen für Stahl im Hochbau. 07/1937. In: Wedler, B.: Berechnungsgrundlagen für Bauten. 21.Aufl.

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Angabe der zulässigen Spannungen in Lagern und Gelenken bei Beanspruchung auf Biegung und Druck sowie Angabe der zulässigen Hertz'schen Spannungen bei Punkt- oder Linienberührung, dabei Unterscheidung nach Lastfällen [in kg/cm²]:

Gusseisen Stahlguss Vergütungsstahl

(Ge 14.91) (Stg 52.81) (StC 35.61)

LF H: 5000 8500 9500

LF HZ: 6000 10000 12000

Bei beweglichen Lagern mit mehr als 2 Walzen Reduzierung der Werte um 1000 kg/cm² [433/S.167]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [433]DIN 1050: Berechnungsgrundlagen für Stahl im Hochbau. 07/1937. In: Wedler, B.: Berechnungsgrundlagen für Bauten. 21.Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1948.

K7- 39: 1937 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St)

Konstruktion: Bezüglich Brückenlager wie 1. Auflage – siehe

Material: K7- 33

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [424]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 806: Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St), 2.Ausgabe 10/1937.

K7- 40: 1938 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 3.Aufl., 11/1938

Konstruktion: Wie K7- 31, zusätzlich für breite Brücke auch querbewegliches Lager gefordert [425/§44]
Gleitlager bis 12 t Auflagerdruck, jetzt abweichend von K7- 31 aber nur bis 10 m Spannweite, [425/§45]; Anzahl der Walzen möglichst gering und gerade [425/§45]

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung: Lagerteile müssen bequem zugänglich und belüftet sein [425/§45]

Sonstiges:

Literatur: [425]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 3.Aufl., 11/1938.

[481]Wagner, K.: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Straßenbrücken. Zentralblatt der Bauverwaltung 58 (1938), S.399-406.

K7- 41: 1938 – DIN 1079: Stählerne Straßenbrücken. Grundsätze für die bauliche Durchbildung, 11/1938

Konstruktion: Angaben in [427/S.14] prinzipiell wie in [435]
Material: DIN 1079 ist im äußeren Aufbau und im Inhalt in enger Anlehnung an die „Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE)“ der Deutschen Reichsbahn aufgestellt [481/S.399]
Bemessung:
Einbau:
Wartung:
Sonstiges:
Literatur: [427]DIN 1079: Stählerne Straßenbrücken. Grundsätze für die bauliche Durchbildung, 11/1938. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949.
[481]Wagner, K.: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Straßenbrücken. Zentralblatt der Bauverwaltung 58 (1938), S.399-406.

K7- 42: 1939 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE) 02/1934, (Nachdruck der 3.Auflage mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Ausgabe 1939

Konstruktion: Wie 3.Auflage, siehe K7- 37,
Material: Für zulässige Spannungen auf Druck und Biegung beanspruchter Lagerteile siehe zugehörige Tafeln [429/S.21]
Bemessung:
Einbau:
Wartung:
Sonstiges:
Literatur: [428]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE) 02/1934, (Nachdruck der 3.Auflage mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Ausgabe 1939. In: [670].
[429]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804a: Tafeln zur Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken nach den Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) von 1934, Ausgabe 1939. In: [670].

K7- 43: 1940 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE) 02/1934, Ausgabe 1940 (mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Nachdruck 1940

Konstruktion: Wie 3.Auflage, siehe K7- 37,
Material: Für zulässige Spannungen auf Druck und Biegung beanspruchter Lagerteile siehe zugehörige Tafeln [431/S.21]
Bemessung:
Einbau:
Wartung:
Sonstiges:
Literatur: [430]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Brücken (BE) 02/1934, Ausgabe 1940 (mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern), Nachdruck 1940. In: [676/352/f].
[431]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804a: Tafeln zur Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken nach den Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE),1934, Ausg.1940. In: [676/352/f].

K7- 44: 1940 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St)

Konstruktion: Bezüglich Brückenlager wie 1. Auflage – siehe

Material: K7- 33

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [432]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 806: Anleitung für die Bauüberwachung von Stahlbauwerken auf der Baustelle (Bau St), 2.Ausgabe 10/1937. Nachdruck 1940.

K7- 45: 1941 – DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken, 3.Ausg., 01/1941

Konstruktion: Angaben in [434/§16] prinzipiell wie in [420]

Material:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [434]DIN 1073: Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken, 3.Ausg., 01/1941. In: Leiser: Vorschriften für Straßenbrücken, T.II: Stählerne Straßenbrücken. Berlin: Ernst & Sohn, 1949.

K7- 46: 1943 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 3.Aufl. Ausgabe 1943, Nachdruck 1955

Konstruktion: Ausführung grundsätzlich als Kipplager, bei breiten Brücken auch in Querrichtung [435/S.32]; Gleitlager bis 12 t Auflagerdruck bzw. bis 10 m Spannweite [435/S.32]
Rollenlager mit Vorzug gegenüber Stelzenlager, stets gerade Anzahl Rollen verwenden [435/S.32]; Rollen und Stelzen mit Einrichtung zur sicheren Führung [435/S.32]
Einfache gedrungene Formen verwenden, Wassersäcke vermeiden [435/S.32f]

Material:

Einbau:

Wartung: Bequeme Zugänglichkeit ist zu gewährleisten, [435/S.33]

Sonstiges:

Literatur: [435]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 805: Grundsätze für die bauliche Durchbildung stählerner Eisenbahnbrücken (GE), 3.Aufl. Ausgabe 1943, Nachdruck 1955.

K7- 47: 1944 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1944

Konstruktion: Wie 3.Auflage, siehe K7- 37,

Material:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [436]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1944.

K7- 48: 1951 – Deutsche Bundesbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift), 10/1951, Ausgabe 1965 mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Reibungswiderstände für
Gleitende Reibung $\mu=0,2$ und für
Rollende Reibung $\mu=0,03$ der Auflagerkraft [440/S.15]
Lagerteile sind für alle lotrechten und waagerechten Belastungen zu berechnen, jedoch für die Lasten Fliehkraft und Seitenstoß nur für die ungünstiger wirkende [440/S.34b]
Angabe von zulässigen Spannungen für Lagerteile und Gelenke [t/cm²]

	GG14	GG18	GG22	St37	GS52.1	C35N
LF H:	5,0	6,0	7,0	6,5	8,5	9,5
LF HZ:	6,0	6,5	7,5	8,0	11,0	12,0

[440/Übersicht 40.1f]
Neue Festlegungen zur Berücksichtigung der Reibungswiderstände [462/S.10]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [440]Deutsche Bundesbahn (Hrsg.): DV 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift), 10/1951, Ausgabe 1965 mit eingearbeiteten Berichtigungsblättern. In: [676].
[462]Kollmar, A.; Jacoby, K.: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) – Neuerungen der Ausgabe 1951. Stahlbau 23 (1954), S.3-15.

K7- 49: 1963 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Dv 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift) und Teil II (Tafeln)

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Reibungswiderstände für
Gleitende Reibung $\mu=0,2$ und für
Rollende Reibung $\mu=0,03$ der Auflagerkraft [439/S.12]
Lagerteile sind für alle lotrechten und waagerechten Belastungen zu berechnen, jedoch für die Lasten Fliehkraft und Seitenstoß nur für die ungünstiger wirkende [439/S.30]
Angabe von zulässigen Spannungen für Lagerteile und Gelenke [kg/cm²]

	St 38	St 52	GS 50.1	C 35
LF H:	6500	9000	9000	9000
LF HZ:	7000	9600	9600	9600
LF HZS:	7500	10200	10200	10200

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [439]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): Dv 804: Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Teil I (Vorschrift) und Teil II (Tafeln), 02/1963. In: [670].

K7- 50: 1966 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804/100: Richtlinien für die Nachrechnung stählerner Eisenbahnbrücken, 10/1966

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Angaben von zulässigen Spannungen für das inzwischen veraltete Gusseisen Ge 14.91 (LF H: 5000 kp/cm²; LF HZ: 6000 kp/cm²) und Verweis auf [436]
„Die zulässigen Spannungen für Lagerteile sind unverändert aus der BE, Ausgabe 1934 übernommen. Für eine versuchsmäßige Überprüfung der Werte bestand keine Veranlassung“ [470/S.282].

Einbau:

Wartung:

Sonstiges: Hinweis, dass Lagerteile nur bei für den Betrieb gefährlichen Schäden auszuwechseln sind [441/S.20]

Literatur: [441]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804/100: Richtlinien für die Nachrechnung stählerner Eisenbahnbrücken, 10/1966.
[470]Säckel, R.: Erläuterungen zur Dv 804/100 „Richtlinie für die Nachrechnung stählerner Eisenbahnbrücken“. Signal und Schiene 12 (1968), S.234-236, 282-285.

K7- 51: 1970 – DIN 1079: Stählerne Straßenbrücken. Grundsätze für die bauliche Durchbildung, 09/1970

Konstruktion: Angaben in [442/S.7] prinzipiell wie [435]

Material: Mit einzelnen Hinweisen für die Verwendung von Verformungslagern.

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [442]DIN 1079: Stählerne Straßenbrücken. Grundsätze für die bauliche Durchbildung, 09/1970.

K7- 52: 1979 – Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Dienstvorschrift für die Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken (BE), 09/1979

Konstruktion: Angaben prinzipiell wie in [446] – vgl. K7- 49. Tafel 19 begrenzt sich jedoch auf die Lastfälle H und HZ, ohne Angaben für den Lastfall HZS.

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [444]Deutsche Reichsbahn (Hrsg.): DV 804: Dienstvorschrift für die Berechnung stählerner Eisenbahnbrücken (BE), 09/1979.

K7- 53: 1985 – DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken. 12/1985

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Für Roll- und Gleitwiderstände der einzelnen Lager Verweis auf die jeweiligen Zulassungsbescheide [445/S.9,P.4.5]
„Für Lager, Pendel und Stelzen herkömmlicher Bauart“ (also für die historischen eisernen und stählernen Brückenlager, A.d.Verf.) gilt:
Für Rollenlager und gewöhnliche Stelzen ein Rollwiderstand von 5% ($\mu=0,05$), bei Pendelhöhen über 3m Verminderung möglich [445/S.9,P.4.5]
Der noch in DIN 1072/11.1967 enthaltene pauschale Faktor für den Reibungswiderstand von Gleitlagern $\mu=0,2$ wurde nicht übernommen, weil Gleitlager Stahl/Stahl prinzipiell veraltet und Versuche zeigten, dass der Gleitfaktor bis $\mu=1,0$ u.U. ansteigen kann.
Der früher übliche Rollwiderstand von 3% wurde nicht übernommen, sondern nach Auswertung von Versuchsergebnissen auf 5% angehoben [445/S.6,Erläuterungen]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [445]DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken. 12/1985.

K7- 54: 1987 - DIN 18 809: Stählerne Straßen- und Wegbrücken. 09/1987, (Ersatz für DIN 1073)

Konstruktion: Verweis auf DIN 4141 – vgl. K8 - 6

Material:

Bemessung:

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [445]DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken. 12/1985.
[446]DIN 18 809: Stählerne Straßen- und Wegbrücken. 09/1987, (Ersatz für DIN 1073).

Katalog K8 – Vorschriften-, Normen- und Regelwerk – Brückenlager

K8 - 1: 1894 – Minister für öffentliche Arbeiten (Hrsg.): Erlaß vom 15.Nov.1894, I.12757 – Allgemeine Bestimmungen ueber die Ausbildung der Lager eiserner Brücken im Bereich der Preußischen Staatsbahnen

Konstruktion:	Für die Lagerteile sind einfache und gedrungene Formen zu wählen, insbesondere die untere Lagerplatte ist aus einem einzigen starken Gussstück zu fertigen, Kipplager grundsätzlich empfohlen, jedoch aus Fertigungsgründen nicht als Halbzapfen, sondern als Zapfen-Kipplager [362/S.495], bei kleineren Brücken Ausführung als Berührungs-Kipplager empfohlen [362/S.496], Bei Rollvorrichtung sind Walzen den Stelzen vorzuziehen, aber Lagesicherung – bei Stelzen auch gegen Umfallen – empfohlen [362/S.496],
Material:	
Bemessung:	Lagerplatte unterhalb der Kippvorrichtung ist zur Gewährleistung gleichmäßiger Lastverteilung auf Biegung zu bemessen [362/S.496]
Einbau:	Auf die Befestigung der unteren Auflagerplatten durch Steinschrauben kann bei größeren Balkenbrücken verzichtet werden [362/S.495]
Wartung:	Ausführung so, dass der Ansammlung von Wasser und Schmutz zwischen den beweglichen Lagerteilen vorgebeugt wird; möglichst hochliegend anordnen, um Beaufschlagung durch Spritzwasser zu vermeiden und Reinigung zu erleichtern [362/S.496]
Sonstiges:	
Literatur:	[362]Minister für öffentliche Arbeiten (Hrsg.): Erlaß vom 15.Nov. 1894, I.12757 - Allgemeine Bestimmungen ueber die Ausbildung der Lager eiserner Brücken im Bereich der Preußischen Staatsbahnen. Centralblatt der Bauverwaltung 14 (1894), S.495-496.

K8 - 2: 1900 – Bayerische Eisenbahnen (Hrsg.): Normale für Stühle und Auflagerplatten v.J. 1900

Konstruktion:	Mit konkreten Angaben für die Ausbildung von Auflagerplatten und Auflagerstühle in Abhängigkeit von der Belastung
Material:	
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Sonstiges:	
Literatur:	[363]Bayerische Eisenbahnen (Hrsg.): Normale für Stühle und Auflagerplatten v.J. 1900. In: [676/352/f/1-3]; (leider nur unvollständig erhalten, A.d.Verf.).

K8 - 3: 1924 – Normblattentwürfe DIN E 1039: Festes Linienkipplager für Balkenbrücken von 125 t bis 300 t Auflagerdruck. DIN E 1040: Bewegliches Linienkipplager für Balkenbrücken von 125 t bis 300 t Auflagerdruck

Konstruktion:	Werkstoff- und Arbeitersparnis maßgebend [364/S.5] Konstruktive Schwächen sollten behoben bzw. vermieden werden, um z.B. den oft beobachteten Rissen in den Auflagerbänken vorzubeugen [364/S.5]
Material:	Gusseiserne Lager nicht mehr berücksichtigt, da kaum noch verwendet [364/S.5]
Bemessung:	Grundlage bilden die Hertz'schen Pressungen unter Berücksichtigung der möglichen Verschiebungen [364]
Einbau:	Grundplatten planmäßig mit Löchern versehen, um über eingesteckte Bolzen das Anschlagen von Kranketten zu erleichtern [364/S.6]
Wartung:	Robustheit und Wartungsfreundlichkeit wurden angestrebt [364/S.5]

Sonstiges:

Literatur: [364]Normblattentwürfe DIN E 1039: Festes Linienkipplager für Balkenbrücken von 125 t bis 300 t Auflagerdruck. DIN E 1040: Bewegliches Linienkipplager für Balkenbrücken von 125 t bis 300 t Auflagerdruck. Bauingenieur 5 (1924), S.5-7.
[468]Ollert: Erläuterungen zu den Normblattentwürfen über feste und bewegliche Lager für Balkenbrücken DIN E 1037 bis DIN E 1040. Baunormung 12 (1933), S.1-8.
[480]Stein: Lager für Balkenbrücken – DIN 1037 bis 1040. Baunormung 12 (1933), S.21.

K8 - 4: 1972 – TGL 24 552 – Brücken im Verkehrsbau – Punktkipplager, 05/1972

Konstruktion:

Material:

Bemessung: Bemessung der Lager in aufgearbeiteten Nomogrammen (Netztafeln) geregelt [368]

Einbau:

Wartung:

Sonstiges:

Literatur: [368]TGL 24 552/02: Punktkipplager – Tragfähigkeitsnachweis, 05/1972.
(leider nur Blatt 2 vorhanden!)

K8 - 5: 1974 – TGL 9098 – Brücken im Verkehrsbau – Linienkipplager, 11/1974 (Ersatz für Ausgabe 9/1969)

Konstruktion: Unterscheidung in
- Festlager niedrig – breite Kippplatte
- Festlager niedrig – schmale Kippplatte
- Festlager hoch
- Festlager hoch – verankert
- Bewegliche Lager – Gleitlager, breite Kippplatte
- Bewegliche Lager – Gleitlager, schmale Kippplatte
- Bewegliche Lager – Einrollenlager
- Bewegliche Lager – Zweirollenlager

Material: Kipp-, Sattel-, Grundplatten sowie Wälzkörper aus GS 50.1 nach TGL 14315 [371/P.5.3]

Bemessung: Reibungsbeiwert nach TGL 0-1072 anzunehmen [370/P.2.2.2]
Kontaktspannung nach Theorie von Hertz zu berechnen [370/P.2.2.2; 4]
Bemessung der Lager in aufgearbeiteten Nomogrammen (Netztafeln) geregelt [372]

Einbau:

Wartung:

Prüfung: Standardgerechte Ausführung ist von der Technischen Kontrollorganisation des Herstellerbetriebes zu prüfen, vor dem Versand zur Baustelle Abnahme der Lager von der Deutschen Reichsbahn oder Staatlichen Bauaufsicht [371/P.6]

Literatur: [370]TGL 9098/01: Linienkipplager – Berechnungsgrundlagen, 11/1974.
[371]TGL 9098/02: Linienkipplager – Abmessungen und Technische Lieferbedingungen, 11/1974.
[372]TGL 9098/03: Linienkipplager – Tragfähigkeitsnachweis, 11/1974.

K8 - 6: 1984 – DIN 4141: Lager im Bauwesen. 09/1984

Konstruktion:	Ohne konkrete Angaben zu historischen Brückenlagern, nur folgende Hinweise: „Die Rollen- und Kipplager [...] sind veraltet und werden bei Neubauten praktisch nicht mehr verwendet. Die Belassung in der Norm erfolgte mit Rücksicht auf bestehende, zu sanierende Bauten“ [373/T.1, S.7, Erläuterungen]. Offenbar war ein extra Normenteil vorgesehen, der jedoch nie erschien [A.d.Verf]. „Die bei alten Brückenbauwerken noch vorhandenen Linienkipplagen sind für moderne Brückenbauwerke ungeeignet und gehören deshalb der Vergangenheit an. Die fehlenden Verdrehungsmöglichkeiten um die Längsachse und um die vertikale Achse sind mit den heute üblichen im Vergleich zu alten Brücken in ihren Tragreserven voll ausgenutzten Konstruktionen in der Regel nicht verträglich. Wenn in dieser Norm die Linienkipplage Berücksichtigung findet, so liegt dies daran, dass man bei bestehenden Bauten für den Fall der Sanierung Regeln haben möchte. Es ist aber zu empfehlen, dennoch in solchen Fällen stets zu prüfen, ob es nicht sinnvoll ist, diese Lager gegen Lager mit Punktkipplage auszuwechseln, wobei selbst geringe Überschreitungen zugelassener Werte [...] immer noch besser sind als die Beibehaltung der Linienlagerung, speziell der Rollenlager mit geringer Verformungstätigkeit“ [373/T.2,S.3, Erläuterungen].
Material:	
Bemessung:	Für Reibungswiderstände Verweis auf die entsprechenden Normenteile [373/T.1,S.2,P.3.2], Lastannahmen entsprechen DIN 1072 oder DS804 [373/T.1,S.4,P.4.1], Bei der Bemessung sind – wenn nicht anders angegeben – Verschiebungen der Lagerteile von $\pm 2,0\text{cm}$ anzunehmen [373/T.1,S.4,P.4.4],
Einbau:	Regelungen für die Aufstellbedingungen [373/T.1,S.4,P.4.3],
Wartung:	Wartung der Lager und rechtzeitige Schadenserkennung muss gewährleistet werden [373/T.1,S.2]; Bemessung der angrenzenden Bauteile muss das Auswechseln ganzer Lager oder einzelner Lagerteile gewährleisten [373/T.1,S.6,P.7.5],
Sonstiges:	
Literatur:	[373]DIN 4141: Lager im Bauwesen. 09/1984.

K8 - 7: 1987 – TGL 24 552: Brücken im Verkehrsbau – Punktkipplager, 01/1987 (Ersatz für Ausgabe 05/1972)

Konstruktion:	
Material:	Lagerteile aus GS-50.1 N+S nach TGL 14315, außer Sicherungsbolzen, Dollen [369/P.3.8]
Bemessung:	
Einbau:	
Wartung:	
Prüfung:	Probeabguss bei der Herstellung, Einzelprüfung nach TGL 43 216 und Bescheinigung nach TGL 16 988 [369/P.4]
Literatur:	[369]TGL 24 552/01: Punktkipplager – Technische Bedingungen, 01/1987.

K8 - 8: ab 1994 – pr DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. (Teile der Vornorm eingeführt ab 03/1994)

Konstruktion:	Die hier relevanten Teile der Vornorm wurden eingeführt am
Material:	Teil 1: Allgemeine Anforderungen 03/1994
Bemessung:	Teil 2: Gleitteile 09/2003
Einbau:	Teil 4: Rollenlager 02/1995
Wartung:	Teil 6: Kipplager 02/1995
Sonstiges:	
Literatur:	[374]pr DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. (Teile der Vornorm eingeführt ab 03/1994).

K8 - 9 2001 – DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 1: Allgemeine Regelungen. 02/2001

Konstruktion: Ohne spezifische Angaben für historische gusseiserne und stählerne Brückenlager (A.d.Verf.)

Material:

Bemessung: Bemessung jetzt nach semiprobabilistischem Sicherheitskonzept

Einbau:

Sonstiges:

Literatur: [375]DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 1: Allgemeine Regelungen. 02/2001.

K8 - 10: 2004 – DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 2: Gleitteile. 07/2004

Konstruktion: Behandelt ausschließlich den Einsatz von PTFE- Gleitelementen (A.d.Verf.).

Material:

Bemessung:

Einbau:

Sonstiges:

Literatur: [376]DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 2: Gleitteile. 07/2004.

K8 - 11: 2004 – DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 4: Rollenlager, 08/2004

Konstruktion: Entsprechend in der Norm definierter Randbedingungen gilt diese nur für normgerecht hergestellte Materialien [377/P.5]. Darüber hinaus müssen in Kontakt stehende Oberflächen dieselbe Härte und Festigkeit besitzen [377/P.6]. In der Regel werden diese Randbedingungen durch historische Brückenlager nicht erfüllt, so dass diese Norm nur als Orientierung bei der Bemessung historischer Brückenlager dienen kann (A.d.Verf.)

Material:

Bemessung:

Einbau:

Sonstiges:

Literatur: [377]DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 4: Rollenlager, 08/2004.

K8 - 12: 2004 – DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 6: Kipplager, 08/2004

Konstruktion: Entsprechend in der Norm definierter Randbedingungen gilt diese nur für normgerecht hergestellte Materialien [378/P.5]. Darüber hinaus müssen in Kontakt stehende Oberflächen dieselbe Härte und Festigkeit besitzen [378/P.6]. In der Regel werden diese Randbedingungen durch historische Brückenlager nicht erfüllt, so dass diese Norm nur als Orientierung bei der Bemessung historischer Brückenlager dienen kann (A.d.Verf.)

Material:

Bemessung:

Einbau:

Literatur: [378]DIN EN 1337: Lager im Bauwesen. Teil 6: Kipplager, 08/2004.

K8 - 13: 2003 – DIN V 4141: Lager im Bauwesen, 05/2003

Konstruktion: Als Fortschreibung der DIN 4141 [373] unter Umstellung auf das semiprobabilistische

Material: Sicherheitskonzept und unter Berücksichtigung von Regelungen der Europäischen

Bemessung: Normenreihe EN 1337 [375ff]

Einbau:

Sonstiges:

Literatur: [379]DIN V 4141: Lager im Bauwesen, 05/2003.

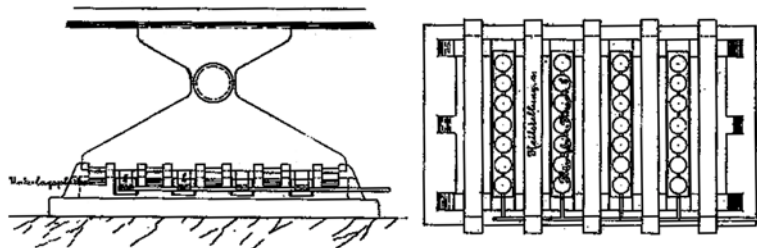
Katalog K9 – Patente

Deutschland

K9 - 1: 1878 – SCHAROWSKY

Titel: Neuerungen an Brücken mit kontinuierlichen Bogenkettenträgern

Abbildung:



Anspruch: 1. [...], 2. [...]

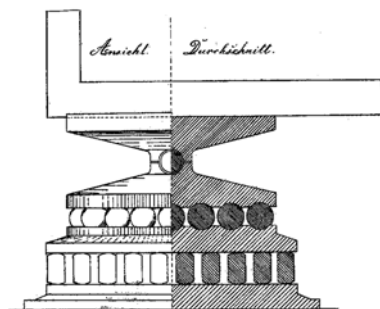
3. durch Flüssigkeitspressen justierbare Auflager zum Ausgleich etwaiger Auflagersenkungen

Literatur: [579]1878, 2.August: Nr. 5041; Scharowsky, C.: Neuerungen an Brücken mit kontinuierlichen Bogenkettenträgern. In: [693/DE 0000 0000 5041A].

K9 - 2: 1878 – JEBENS

Titel: Auflager für Brückenträger, welche um eine vertikale Axe drehbar sind

Abbildung:



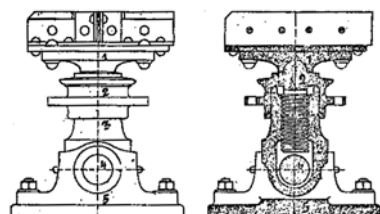
Anspruch: Ermöglichen einer Drehung der Hauptträgerenden aus ihrer Vertikalebene

Literatur: [580]1878, 18.September: Nr. 4926; Jebens: Auflager für Brückenträger, welche um eine vertikale Axe drehbar sind. In: [693/DE 0000 0000 4926A].

K9 - 3: 1878 – GENG

Titel: Neuerungen von Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Combination von Kugel und Schraube oder von Kugel, Schraube und Pendel [581] erweitert durch Zusatzpatente für Verbesserungen in [582] und [583]

Abbildung:



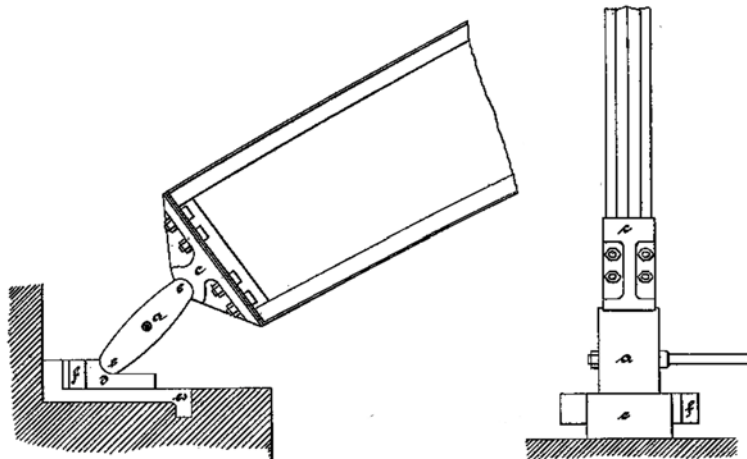
Anspruch: Bildung eines Lagers durch Kombination von Kugel und Schraube oder von Kugel, Schraube und Pendel

- Literatur: [581]1878, 11.Dezember: Nr. 6482; Geng, M.: Neuerungen von Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Kombination von Kugel und Schraube oder von Kugel, Schraube und Pendel. In: [693/DE 0000 0000 6482A].
- [582]1879, 25.März: Nr. 8646; Geng, M.: Verbesserungen an Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Combination von Kugel und Schraube oder Kugel, Schraube und Pendel. In: [693/DE 0000 0000 8646A].
- [583]1879, 11.November: Nr. 9600; Geng, M.: Verbesserungen an Auflagern für eiserne Brücken und Dachstühle durch Combination von Kugel und Schraube oder Kugel, Schraube und Pendel. In: [693/DE 0000 0000 9600A].

K9 - 4: 1881 – BÄHRECKE

Titel: Schublager für Brücken- und Dachconstruktionen

Abbildung:



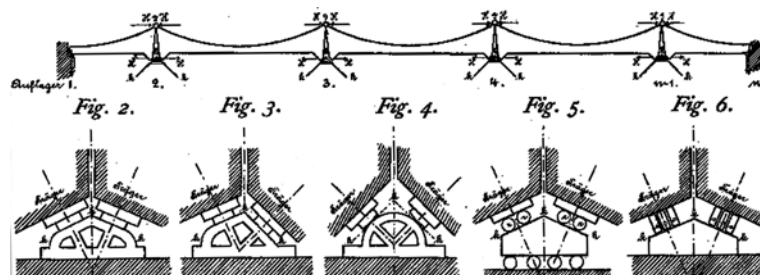
Anspruch: Anwendung eines geneigten Stützkörpers zwischen Trägerende und Unterbau zur Beeinflussung/Manipulation des statischen Systems des Überbaus

Literatur: [584]1881, 3.Juli: Nr. 16467; Bährecke: Schublager für Brücken- und Dachconstruktionen. In: [693/DE 0000 001 6467A].

K9 - 5: 1889 – OFFERMANN

Titel: Keilförmige Auflager für kontinuierliche Gelenkträger

Abbildung:

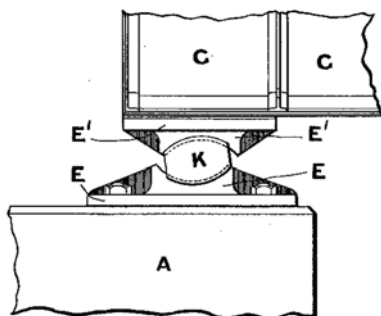


Anspruch: Anordnung keilförmig gebildeter Auflager für Träger in Verbindung mit einem Gelenk am Auflager, ggf. ergänzt durch Rollen oder Stelzen

Literatur: [585]1889, 22.März: Nr. 48557; Offermann, C.: Keilförmige Auflager für kontinuierliche Gelenkträger. In: [693/ DE 0000 0004 8557].

Titel: Auflager für Träger, Binder u.dgl.

Abbildung:

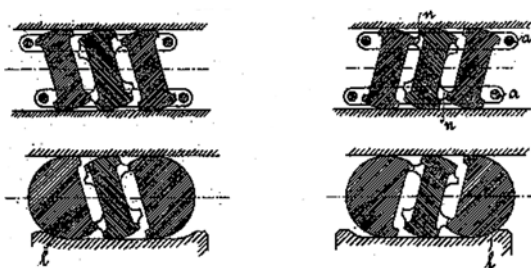


Anspruch: Einbau eines „liegenden Bogenzweiecks“, dass sich bei einer Trägerlängsverschiebung im entgegengesetzten Sinne verschiebt und jederzeit eine vollkommene Flächenstützung gewährleistet

Literatur: [586]1896, 2.Juli: Nr. 97425; Westwood, A.: Auflager für Träger, Binder u.dgl. In: [693/DE 0000 0009 7425A].

Titel: Standsicheres Trägerauflager mit beweglichen Stützen (Pendeln, Stelzen, Rollen)

Abbildung:

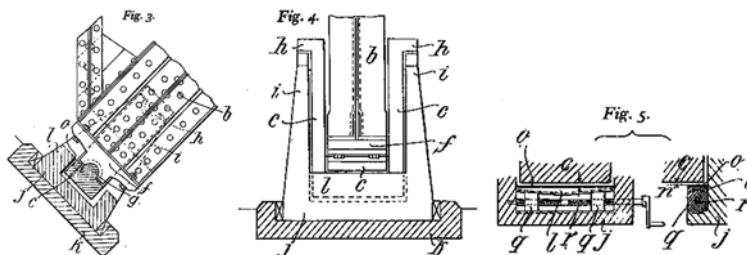


Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die Stützen bei einer gewissen Schiefstellung mittels seitlicher Ansätze sich zu einem steifen System gegenseitig festlegen.

Literatur: [587]1900, 3.August Nr. 123912; Bernhard, C.: Standsicheres Trägerauflager mit beweglichen Stützen (Pendeln, Stelzen, Rollen). In: [693/DE 0000 0012 3912A].

Titel: Auflageranordnung für Brückenträger

Abbildung:



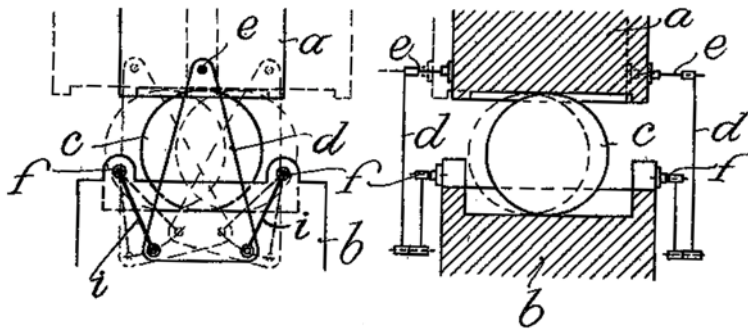
Anspruch: Lager, um im Träger Spannungen zu erzeugen, die den durch die Belastung entstehenden Spannungen entgegengesetzt sind, dadurch gekennzeichnet, dass der nach den üblichen Formen gestaltete oder der an seinen Enden mit abwärts reichenden Ansätzen versehene Brückenträger mit seinen Enden oder den Enden dieser Ansätze durch gleichmäßig gegen die Lotrechte geneigte Lenker an Festpunkten aufgehängt ist, wobei die Bewegung der unteren Trägerenden durch Anschläge auf das durch die Wärmeschwankungen bedingte Maß beschränkt ist.

Literatur: [588]1901, 27.Juli: Nr. 148575; Ghira, A.: Auflageranordnung für Brückenträger. In: [693/DE 0000 0014 8575A].

K9 - 9: 1906 – BERNHARD

Titel: Bewegliches Lager für Brücken und ähnliche Bauwerke

Abbildung:



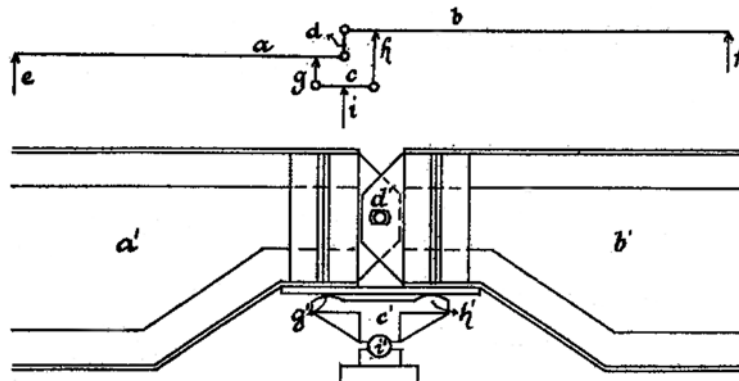
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die durch einen die Druckkräfte übertragenden beweglichen Lagerkörper (Pendel, Kugel, Walze) voneinander getrennte obere und untere Platte des Lagers durch eine Gelenkgeradführung miteinander verbunden sind, welche die auf das Lager wirkenden Zugkräfte überträgt, ohne die parallele Bewegung der Lagerteile zueinander zu hindern.

Literatur: [589]1906, 12.Juni: Nr. 192641; Bernhard, K.: Bewegliche Lager für Brücken und ähnliche Bauwerke. In: [693 / DE 0000 0019 2641A].

K9 - 10: 1910 – THIEME

Titel: Gemeinsame Lagerung aneinanderstoßender Träger

Abbildung:



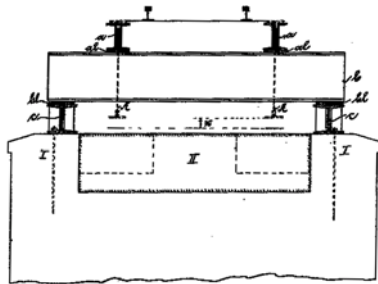
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass eine Art Waagebalken beide Balkenenden unterstützt, die durch einen senkrechte Verschiebungen verhindernden Bauteil miteinander verbunden sind.

Literatur: [590]1910, 3.April: Nr. 232519; Thieme, J.: Gemeinsame Lagerung aneinanderstoßender Träger. In: [693/ DE 0000 0023 2519A].

K9 - 11: 1923 – RASCH

Titel: Auflagerung von Brückenträgern für die Auswechslung schadhaften Auflagermauerwerks an Brückenpfeilern und sonstigen Widerlagern

Abbildung:



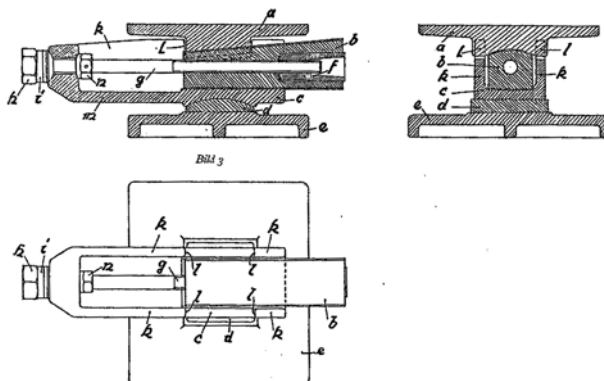
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die oben zu beiden Seiten des Stehbleches mit senkrecht zur Brückenachse ausladenden Walzeisen verstärkten Enden der angehobenen Hauptträger von je einem in Ausschnitte der Hauptträger eingreifenden, zur Brückenachse senkrechten, oben mit Auflagerplatten versehenen Doppel-T-Walzeisen getragen werden, die auf seitlich des schadhaften Mauerwerks parallel zur Brückenachse aufgelegten, oben mit Auflagerplatten versehenen Trägern aufrufen.

Literatur: [591]1923, 11.Juli; Nr. 398249; Rasch, E.: Auflagerung von Brückenträgern für die Auswechslung schadhaften Auflagermauerwerks an Brückenpfeilern und sonstigen Widerlagern. In: [693/DE 0000 0039 8249A].

K9 - 12: 1925 – SCHMÜCKING

Titel: Mittels eines oder mehrerer Keile nachstellbares Stützlager zum Heben und Senken von Bauwerken

Abbildung:



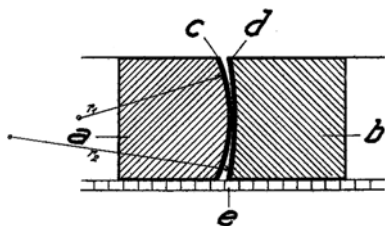
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere die Kopfplatte tragende, durch Zug- oder Druckvorrichtungen bewegte, keilige Stützplatten in einem rahmenartigen Kasten geführt sind, wobei die Seitenwände des Kastens der Kopfplatte entsprechende Ausschnitte besitzen, an deren Innenseiten die Kopfplatte entsprechend der Keilbewegung anliegt.

Literatur: [592]1925, 22.April; Nr. 519366; Schmücking, G.: Mittels eines oder mehrerer Keile nachstellbares Stützlager zum Heben und Senken von Bauwerken. In: [693/DE 0000 0051 9366A].

K9 - 13: 1927 – BURKHARDT

Titel: Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen

Abbildung:



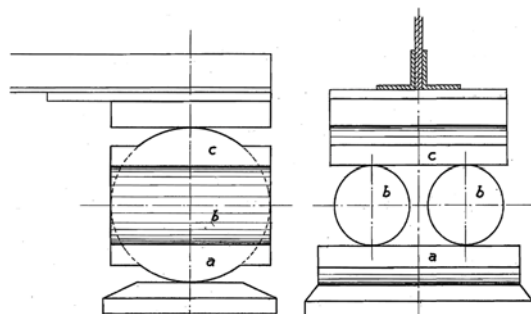
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die Wälzfläche dieser Quader aus je einem mit Eisenteilen nicht verbundenen Blech besteht, gegen welches der Beton gestampft ist.

Literatur: [593]1927, 23.August: Nr. 529 886; Burkhardt, E.: Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen. In: [693/ DE 0000 0052 9886A].

K9 - 14: 1931 – Aktien-Gesellschaft für Eisenindustrie und Brückenbau vormals Johann Caspar Harkort Duisburg

Titel: Längs- und querbewegliches Walzenlager

Abbildung:



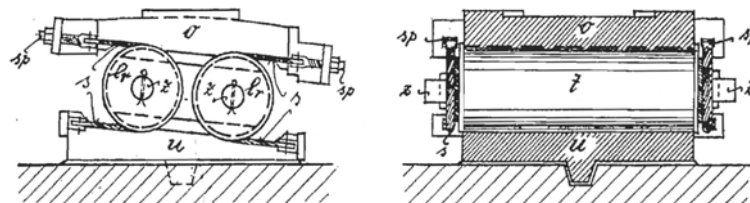
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die Walzen für die eine Bewegungsrichtung zwischen zwei Wälzkörper eingebaut sind, von denen der untere auf der Unterseite und der obere auf der Oberseite mit quer zur Achsen der Walzen liegenden zylindrischen Wölbungen versehen ist.

Literatur: [594]1931, 20.Januar: Nr. 534917; Aktien-Gesellschaft für Eisenindustrie und Brückenbau vormals Johann Caspar Harkort Duisburg: Längs- und querbewegliches Walzenlager. In: [694/DE534917].

K9 - 15: 1932 – JÜNGLING; FRENTZ

Titel: Brückenrollenlager mit geneigten Wälzflächen

Abbildung:



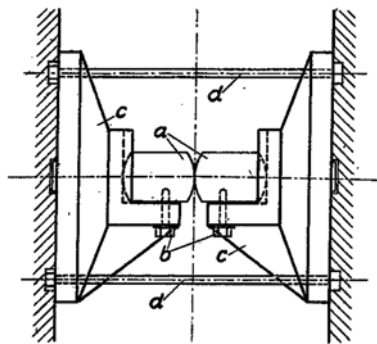
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die obere Lagerplatte und die untere Lagerplatte durch an den Enden der Lagerplatten befestigte, über die Lagerrollen geführte Zugmittel verbunden sind.

Literatur: [595]1932, 25.Mai: Nr. 595405; Jüngling, A.; Frentz, L.: Brückenrollenlager mit geneigten Wälzflächen. In: [693/ DE 00000595405].

K9 - 16: 1932 – FRITZ

Titel: Auswechselbares Stahlgelenk für Bogenbrücken

Abbildung:



Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass das Stahlgelenk zum Zwecke seiner Verwendung bei vorübergehend als Dreigelenkbogen ausgebildeten Bogenbrücken ein Zwischenglied aufweist, das mit den Lagerkörpern in lösbarer Verbindung steht, vor der Entspannung aber nur an einer Berührungsstelle ein gegenseitiges Verdrehen der Lagerkörper ermöglicht.
[...]

Literatur: [596]1932, 31. Dezember; Nr. 651947; Fritz, B.: Auswechselbares Stahlgelenk für Bogenbrücken. In: [693/ DE 0000 0065 1947A].

K9 - 17: 1936 – BURKHARDT

Titel: Rollenlager für Brücken

Abbildung: Patentschrift ohne Abbildung

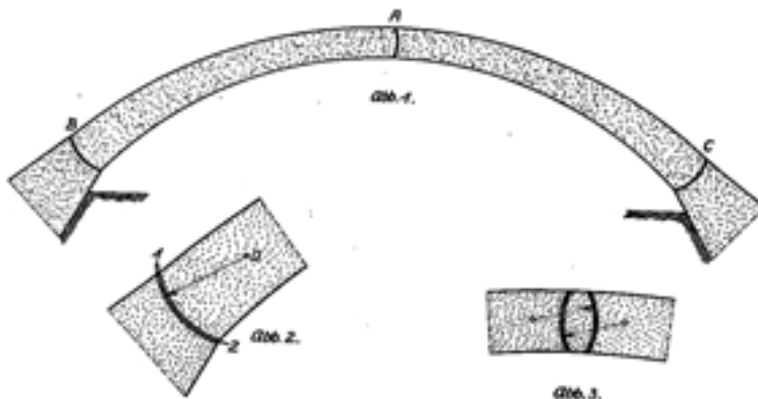
Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass die Rollen aus einem Metallrohr bestehen, das mit unter hohem Druck eingebrachtem und erhärtetem Beton gefüllt ist.

Literatur: [597]1936, 5.Juni; Nr. 678740; Burkhardt, E.: Rollenlager für Brücken. In: [693/DE 0000 0067 8740A].

K9 - 18: 1937 – KAMMÜLLER

Titel: Drehgelenk für Gewölbe und Rahmen

Abbildung:



Anspruch:

1. Drehgelenk für Gewölbe und Rahmen, bei welchem in die Gelenkfuge eine zwischen Metallblechen angeordnete plastische Masse eingelegt ist, gekennzeichnet durch eine das Heraustreten der plastischen Masse aus der Gelenkfuge verhindernde Ummantelung.
2. Drehgelenk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ummantelung aus zwei oder mehr zylindrisch gebogenen Metallblechen mit hauchdünnen Zwischenräumen besteht, in denen sich die plastische Masse befindet. [...]

Literatur: [598]1937, 23.März; Nr.685242; Kammüller, K.: Drehgelenk für Gewölbe und Rahmen. In: [693/DE 0000 0068 5242A].

K9 - 19: 1937 – SCHÖNHÖFER

Titel:	Bewegliches Auflager mit Kugeln, insbesondere für Brücken [599] mit Zusatzpatent für bewegliches Auflager mit Rollen [600]
Abbildung:	Patentschrift ohne Abbildung
Anspruch:	Dadurch gekennzeichnet, dass zahlreiche, etwa 10 bis 30 mm starke Kugeln zwischen zwei dünnen, aus einem dem Kugelstahl gleichwertigen Stahl bestehenden Platten gelagert und gruppenweise in einem auf der unteren Platte schleifenden Zellenrahmen, dessen Höhe kleiner ist als der Durchmesser der Kugeln, geführt sind und dass zwischen den Stahlplatten und den darüber- und darunterliegenden Lagerkörpern dünne Weichmetallplatten angeordnet sind.
Literatur:	[600]1940, 22.Februar: Nr. 712801; Schönhöfer, R.: Bewegliches Auflager. In: [693/DE 0000 0071 2801A].

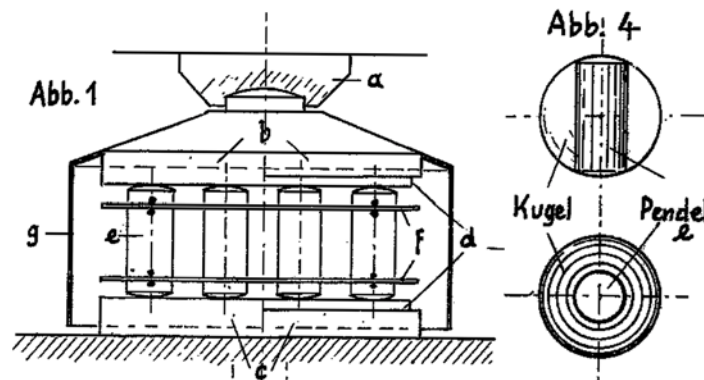
K9 - 20: 1941 (angemeldet) – SCHÖNHÖFER

Titel:	Auflager für Tragwerke, insbesondere Brücken mit großer Tragfähigkeit
Abbildung:	Patentschrift ohne Abbildung
Anspruch:	<p>1. Dadurch gekennzeichnet, dass die Auflager im Bereich ihrer Berührungsfläche eine Brinellhärte von ungefähr 600 bis 700 kg/mm² und mehr aufweisen.</p> <p>2. Auflager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass bei Linienberührung der Lagerkörper Plattenstreifen, bei Punktberührung dagegen Kreisplatten aus Edelstahl großer Brinellhärte angeordnet sind.</p> <p>[...]</p> <p>6. Auflager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Brinellhärte von etwa 600 bis 700 kg/mm² und mehr durch eine entsprechend tiefgehende Härtung der Oberfläche erhalten ist.</p>
Literatur:	[601]1941, 29.Mai: Anmeldung von Nr.1024108; Schönhöfer, M.: Auflager für Tragwerke, insbesondere Brücken mit großer Tragfähigkeit. In: [693/DE 0000 0102 4108A].

K9 - 21: 1942 – GEORGENSGMÜND

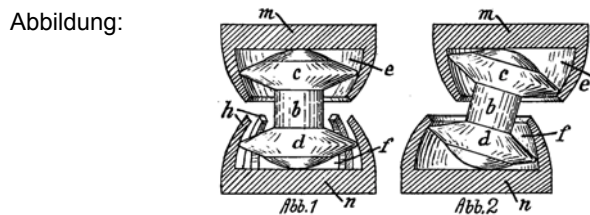
Titel: Allseitig bewegliches Brückenlager

Abbildung:



Anspruch:	Allseitig bewegliches Lager mit Zwischenplatten aus hochwertigem Stahl, dadurch gekennzeichnet, dass die druckübertragenden Glieder zwischen den Zwischenplatten des festen und beweglichen Lagerteils aus Kugelpendeln bestehen, d.h. aus Stelzen beliebigen Querschnitts, deren Kopf und Fuß von einem Kugelabschnitt mit in der Achse der Stelzen liegendem Kugelmittelpunkt gebildet sind.
Literatur:	[602]1942, 12.Dezember: Nr.941798; Georgensgmünd, G.L.: Allseitig bewegliches Brückenlager. In: [693 /DE 0000 0094 1798B].

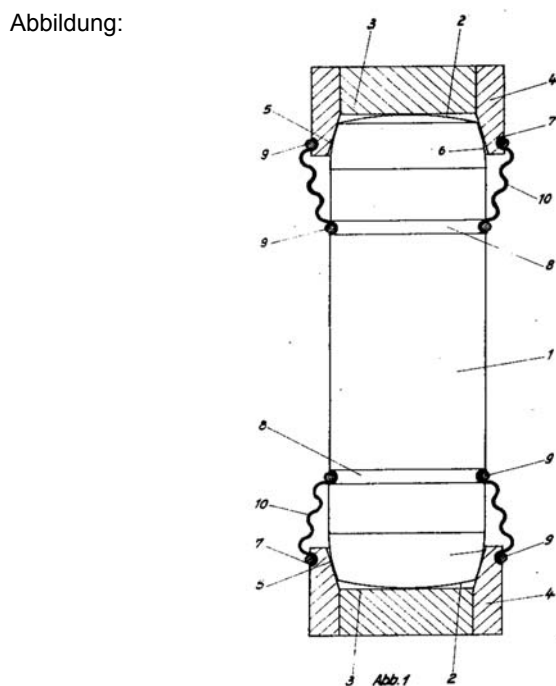
Titel: Führung für pendelnd sich bewegende Wälzkörper



Anspruch: 1. Dadurch gekennzeichnet, dass bei einer pendelnden Bewegung in einer Richtung der Wälzkörper aus einem Zylinderabschnitt besteht, an den sich beiderseits Auskragungen mit geraden Schneiden als Führungskanten anschließen, und dass der Wälzkörper sich auf einer ebenen Platte bewegt, an die sich beiderseits klauenförmige Teile als Führungsgefäß anschließen, wobei die beiden Innenflächen des Führungsgefäßes Zylinderflächen sind, die durch geradlinige Bewegung der Rolllinie eines Punktes der Führungskanten entstanden sind und dass bei der pendelnden Bewegung die Führungskanten an den Flächen des Führungsgefäßes entlang gleiten.
[...]

Literatur: [603]1946, 2.Okt.: Nr.879937; Schönhöfer, R.: Führung für pendelnd sich bewegende Wälzkörper. In: [693 /DE 0000 0087 9937B].

Titel: Pendelstütze

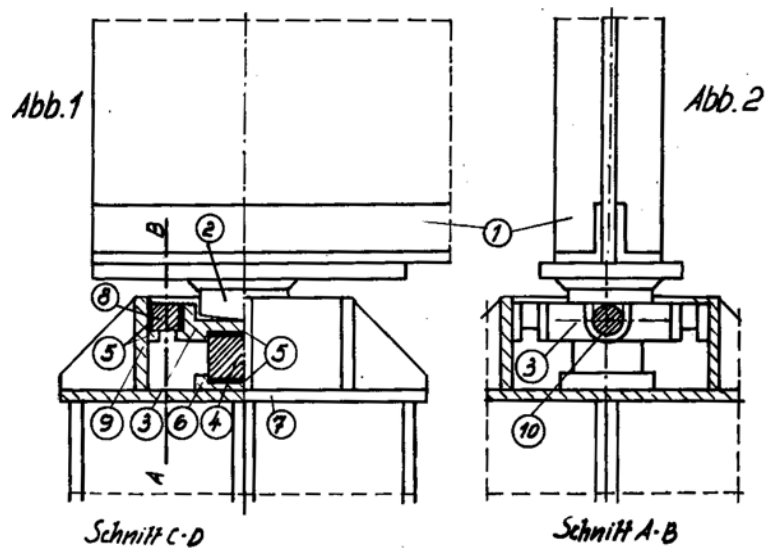


Anspruch: 1. Dadurch gekennzeichnet, dass an die gewölbten Endflächen des Stützkörpers sich weitere gewölbte Flächen anschließen, welche sich an entsprechende, an den Auflagern vorgesehene Abwälzflächen anlegen und auf denen sie sich beim Ausschwenken der Stützen aus der Mittellage abwälzen.
2. Pendelstütze nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Stützflächen durch Balgdichtungen geschützt sind, welche an den Auflagern und der Pendelstütze befestigt sind.

Literatur: [604]1948, 2.Oktober: Nr.810333; Bezold, H.v.: Pendelstütze. In: [693/DE 0000 0081 0333B].

Titel: Elektrisch isoliertes Brückenlager

Abbildung:



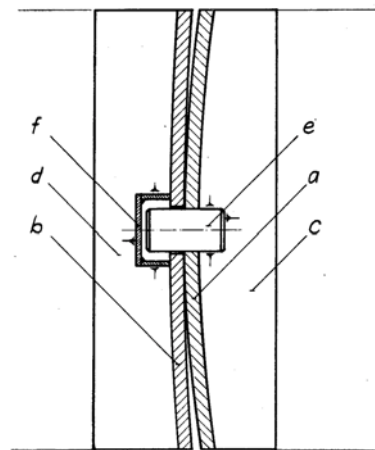
Anspruch: 1. Dadurch gekennzeichnet, dass der die auftretenden Druck- und Schubkräfte übertragende Brückenzapfen mit Spiel in einem inneren Metallrahmen gelagert ist, welcher durch keramische Isolierkörper in einem bestimmten Abstand von einer mit dem Brückenwiderlager befestigten Lagerfassung sowie einem äußeren Metallrahmen gehalten ist.

[...]

Literatur: [605]1949, 4.August: Nr.826597; Steatit-Magnesia A.G.: Elektrisch isoliertes Brückenlager. In: [693/DE 0000 0082 6597B].

Titel: Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen

Abbildung:



Anspruch: 1. Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen, bei welchen die Wälzflächen aus je einem mit Aussteifungen versehenen Blech bestehen, gegen welchen der Beton gestampft wird, dadurch gekennzeichnet, dass die zur Aufnahme von Querkräften dienenden Dollen und die Dollenkapseln mit den Aussteifungen verbunden sind.

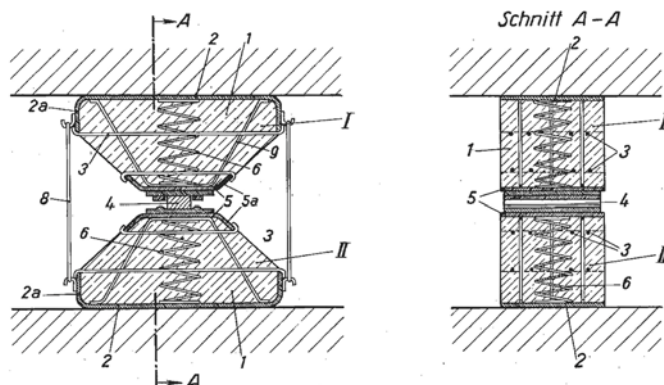
[...]

Literatur: [606]1950, 17.Mai: Nr.812559; Burkhardt, E.: Wälzgelenk aus Beton für Gelenkbrücken und gelenkig gelagerte Konstruktionen. In: [693/DE 0000 0081 2559B].

K9 - 26: 1951 – KAMMÜLLER

Titel: Lagerkörper aus Stahlbeton für Brücken oder Bauten aller Art aus Stahl oder Stahlbeton

Abbildung:



Anspruch: Dadurch gekennzeichnet, dass an der der Wälzfläche entgegengesetzt liegenden Stirfläche des Lagerkörpers ebenfalls eine Stahlplatte angeordnet ist und dass die beiden Stahlplatten U-förmig oder tellerartig abgebogene Ränder aufweisen, die den Lagerkörper umfassen.

Literatur: [607]1951, 30.Juni: Nr.973210; Kammüller, K.: Lagerkörper aus Stahlbeton für Brücken oder Bauten aller Art aus Stahl oder Stahlbeton. In: [693/DE 0000 0097 3210B].

Großbritannien

K9 - 27: 1889 – WESTWOOD; RIGBY

Titel: Originaldokument lag nicht vor, wie K9 - 40

Beschreibung:

Literatur: [624]1892, 16. August: No.480,863; Westwood, C.J.; Rigby, H.: Hinged Expansion Gear for Bridges. In: [693/ US 0000 0048 0863A].

K9 - 28: 1895 – WESTWOOD

Titel: wie K9 - 6

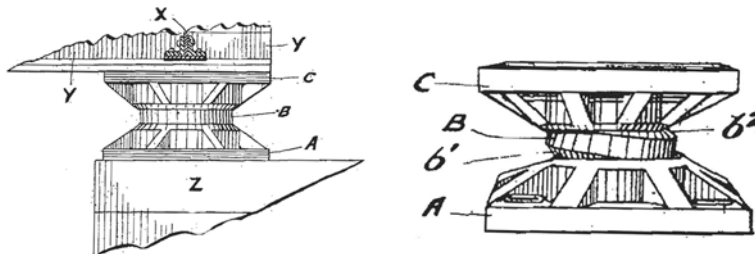
Beschreibung:

Literatur: [610]1895, 4.Dezember: No.23,212; Westwood, A.: Means for supporting Ends of Girders. In: [694/ GB 189523212].

K9 - 29: 1899 – WATTS

Titel: Improvements in Bearings for Bridges, Girders, and Principals

Abbildung:



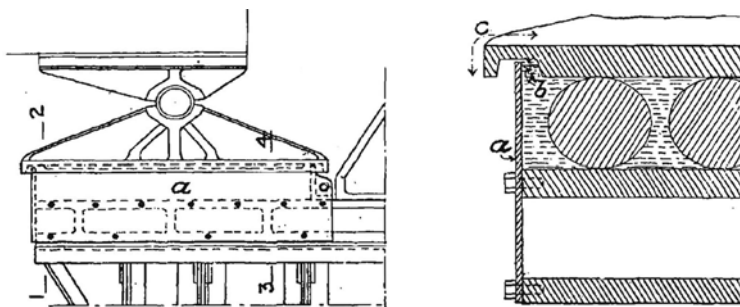
Beschreibung: im Prinzip wie 1895 - WESTWOOD (K9 - 28), aber als „Kugelzapfen“ für allseitige Bewegung

Literatur: [612]1899, 6.Mai: Watts; No.14,080; Watts, W.G.: Improvements in Bearings for Bridges, Girders, and Principals. In: [694/GB 189814080].

K9 - 30: 1903 – WARD

Titel: Improvements in Movable or Expansion Bearings for Bridges or other Structures

Abbildung:



Beschreibung: Ein durch Flüssigkeit geschmierter und geschützter Satz von Wälzkörpern

Literatur: [614]1903, 3.Dezember: No.919; Ward, G.: Improvements in Movable or Expansion Bearings for Bridges o other Structures. In: [694/GB 190300919].

K9 - 31: 1911 – THIEME

Titel: Originaldokument lag nicht vor, aber wie K9 - 10

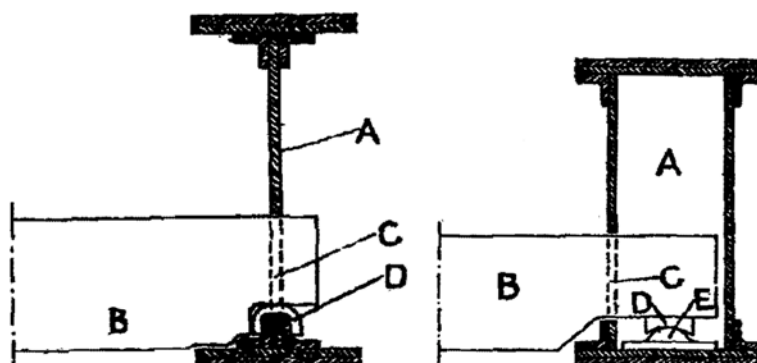
Beschreibung:

Literatur: [615]1911, 21.September: No.191108210, Thieme J.: Joint Support of Contiguous Beams. In: [693/GB 00089 0018054A].

K9 - 32: 1912 – LAVINGTON NOWELL; NICHOLAS

Titel: Improvements in or relating to Metal Beams or Girders

Abbildung:



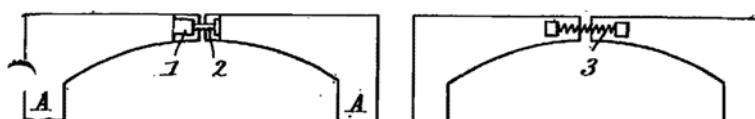
Anspruch: Realisiert zentrische Lasteinleitung des Nebenträgers in den Hauptträger

Literatur: [616]1912, 3.Oktober: No.13,653; Lavington Nowell, J.F.; Nicholas, J.S.: Improvements in or relating to Metal Beams or Girders. In: [694/GB 13653].

K9 - 33: 1916 – PELNARD-CONSIDÈRE

Titel: Improvements in or relating to Bridges

Abbildung:



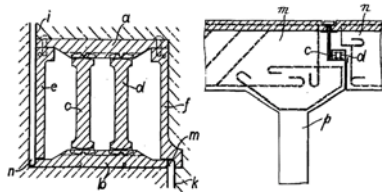
Anspruch: Verbindung auskragender Bauteile durch eine flexible und nachstellbare Konstruktion

Literatur: [617]1916, 10.Januar: No.351; Pelnard-Considère, L.: Improvements in or relating to Bridges. In: [694/ GB 351].

K9 - 34: 1930 – BAUER

Titel: An Expansion Joint for Concrete Structures

Abbildung:



Anspruch: Eingehauste Brückenlager mittels Wälzkörper für Stahlbetonkonstruktionen

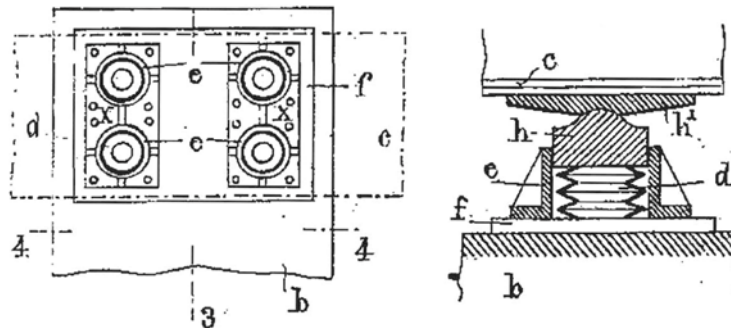
Literatur: [618]1930, 23.Januar: No.303,445; Bauer, Br.: An Expansion Joint for Concrete Structures. In: [694/ GB 303445].

Frankreich

K9 - 35: 1920 – RABUT

Titel: Elastische Stütze für Durchlaufbalken/-träger

Abbildung:



Beschreibung:

Betrifft

1) die Zwischenschaltung einer elastischen Stützung zwischen einem durchlaufenden Träger und seinen Auflagern

2) den Aufbau/die Bildung der elastischen Stütze durch Federn, die in Gehäusen/Buchsen sitzen, welche mit Schrauben/Bolzen auf einer auf der Zwischenstütze eingemauerten Platte befestigt sind, wobei diese Buchsen als Führung für Tauchkolben dienen, die mit dem Balken/Träger fest verbunden sind, welcher auf den genannten Federn ruht.

Literatur: [619]1920, 3.Juli : No.507,751; Rabut, Ch.: Support élastique pour poutres continues. In: [693/ FR 00000507751A].

K9 - 36: 1943 – HILGERS AG.

Titel: Auflagerteil mit großer Tragfähigkeit

Abbildung: Patentschrift ohne Abbildung

Beschreibung:

Dadurch gekennzeichnet, dass

a) die Auflagerteile in der unmittelbaren Umgebung ihrer Kontaktflächen eine Brinellhärte von ungefähr 600-700 kg/mm² und mehr haben

b) die Auflager in der unmittelbaren Umgebung des Kontakts über Platten aus Spezialstahl großer Brinellhärte verfügen, die man aufsetzt oder einlässt

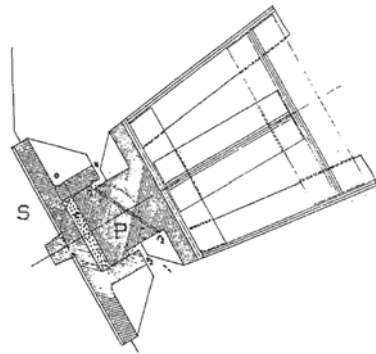
...

Literatur: [620]1943, 22.Februar : No.882,277; Hilgers A.G.: Pièce de portée à grand pouvoir portant. In: [693/ FR 00000882277A].

K9 - 37: 1947 – BERTHAUD

Titel: Gelenkverbindung für Brücken und Tragwerke

Abbildung:



Beschreibung: Gelenkwirkung durch Sand- oder Granulateinlagen (Ähnlich Sandtopf)

Literatur: [621]1947, 10.Februar : No.922,771; Berthaud, L.-P.-E.: Articulation pour ponts et charpentes. In: [693/ FR 00000922771A].

K9 - 38: 1950 – KAMMÜLLER

Titel: Brückenlager mit Stahlbetongelenk

Abbildung: siehe K9 - 26

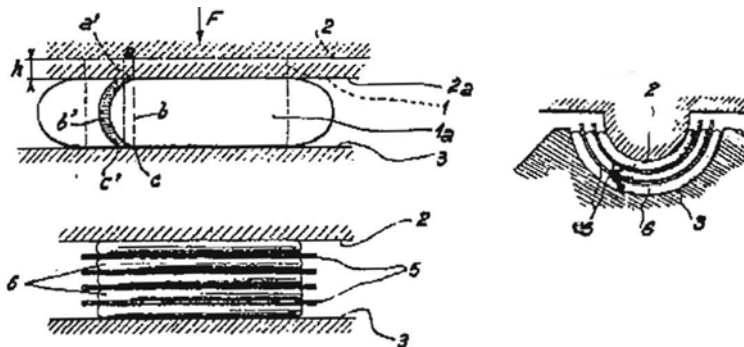
Beschreibung: siehe K9 - 26

Literatur: [622]1950, 12.April : No.968,235; Kammüller, K.: Appui de pont à articulation en béton armé. In: [693/ FR 00000968235A].

K9 - 39: 1955 – FREYSSINET

Titel: Anordnung elastischer Verbindung mit einem oder mehreren Freiheitsgraden

Abbildung:



Beschreibung: umfasst:

1) eine elastische Verbindungsanordnung mit einem Freiheitsgrad zumindest zwischen 2 starren Teilen; eine Anordnung, gemäß derer zwischen ungefähr parallelen Flächen, die zu den genannten starren Teilen gehören, ein Block eingeschoben wird, der aus einem Stapel Platten aus kautschukartigem Werkstoff gebildet ist, zwischen denen nicht dehbare Blätter eingelegt sind, deren Oberflächen einen großen Reibungskoeffizienten bei Kontakt mit den genannten Platten besitzen.

[...]

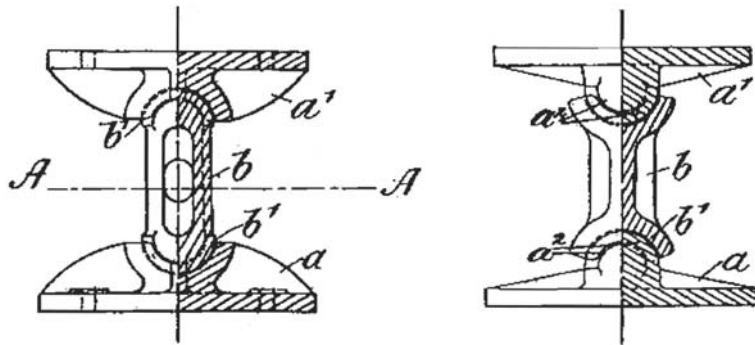
Literatur: [623]1955, 25.Mai: No.1,110,285; Freyssinet, E.: Dispositif de liaison élastique à un ou plusieurs degrés de liberté. In: [693/ FR 000001110285A].

USA

K9 - 40: 1892 – WESTWOOD; RIGBY

Titel: Hinged Expansion-Gear for Bridges

Abbildung:



Beschreibung: Vorrichtung aus oberer und unterer Lagerplatte und zwischenliegendem Verbindungsstück im Sinne einer Pendelstütze

Literatur: [624]1892, 16. August: No.480,863; Westwood, C.J.; Rigby, H.: Hinged Expansion Gear for Bridges. In: [693/ US 0000 0048 0863A].

K9 - 41: 1897 – WESTWOOD

Titel: Means for Supporting Ends of Girders

Abbildung: siehe K9 - 6

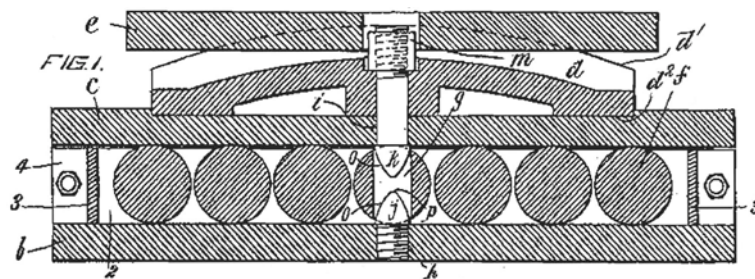
Beschreibung: siehe K9 - 6

Literatur: [625]1897, 2.November: No.592,852; Westwood, A.: Means for supporting Ends of Girders. In: [693/ US 0000 0059 2852A].

K9 - 42: 1906 – MOTLEY

Titel: Means for Supporting the Expansion Ends of Bridges

Abbildung:



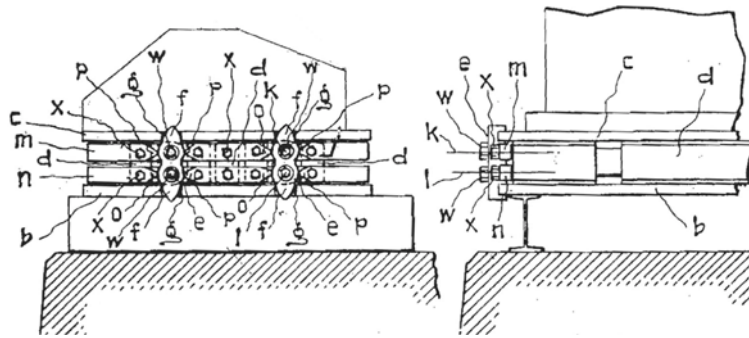
Beschreibung: Wälzlager mit speziellen Vorrichtungen zur Lagesicherung der Wälzkörper zueinander und zur Lagerachse

Literatur: [626]1906, 2.Januar: No.809,071; Motley, P.B.: Means for supporting the Expansion Ends of Bridges. In: [693 / US 0000 0080 9071A].

K9 - 46: 1925 – DRAPER

Titel: Roller Bearing

Abbildung:



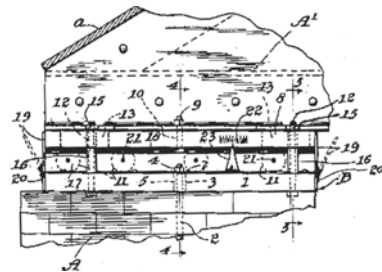
Beschreibung: Zur Sicherstellung einer korrekten Lage der Wälzkörper und einer Kontrollmöglichkeit

Literatur: [630]1925, 17.November: No.1,562,312; Draper, Ch.F.: Roller Bearing. In: [694/ US 1562312].

K9 - 47: 1930 – McKEOWN

Titel: Expansion Bearing

Abbildung:



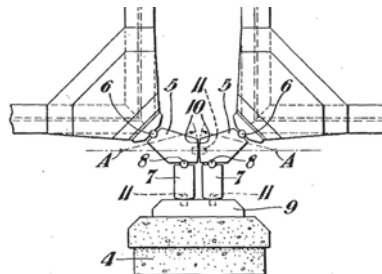
Beschreibung: Wälzlager, um Schäden am Unterbau zu vermeiden (im Prinzip ein ganz normales Rollenlager)

Literatur: [631]1930, 11.November: No.1,781,517; McKeown, J.L.: Expansion Bearings. In: [693/ US 000001781517A].

K9 - 48: 1942 – MacDONALD

Titel: Moment Distributing Bearing

Abbildung:



Beschreibung: für Durchlaufträger mit gemeinsamem Auflager zur Entlastung des Unterbaus

Literatur: [632]1942, 28.April: No.2,281,364; MacDonald, A.F.: Moment Distributing Bearing. In: [694/ US 2281364].

11.2 Übersichten

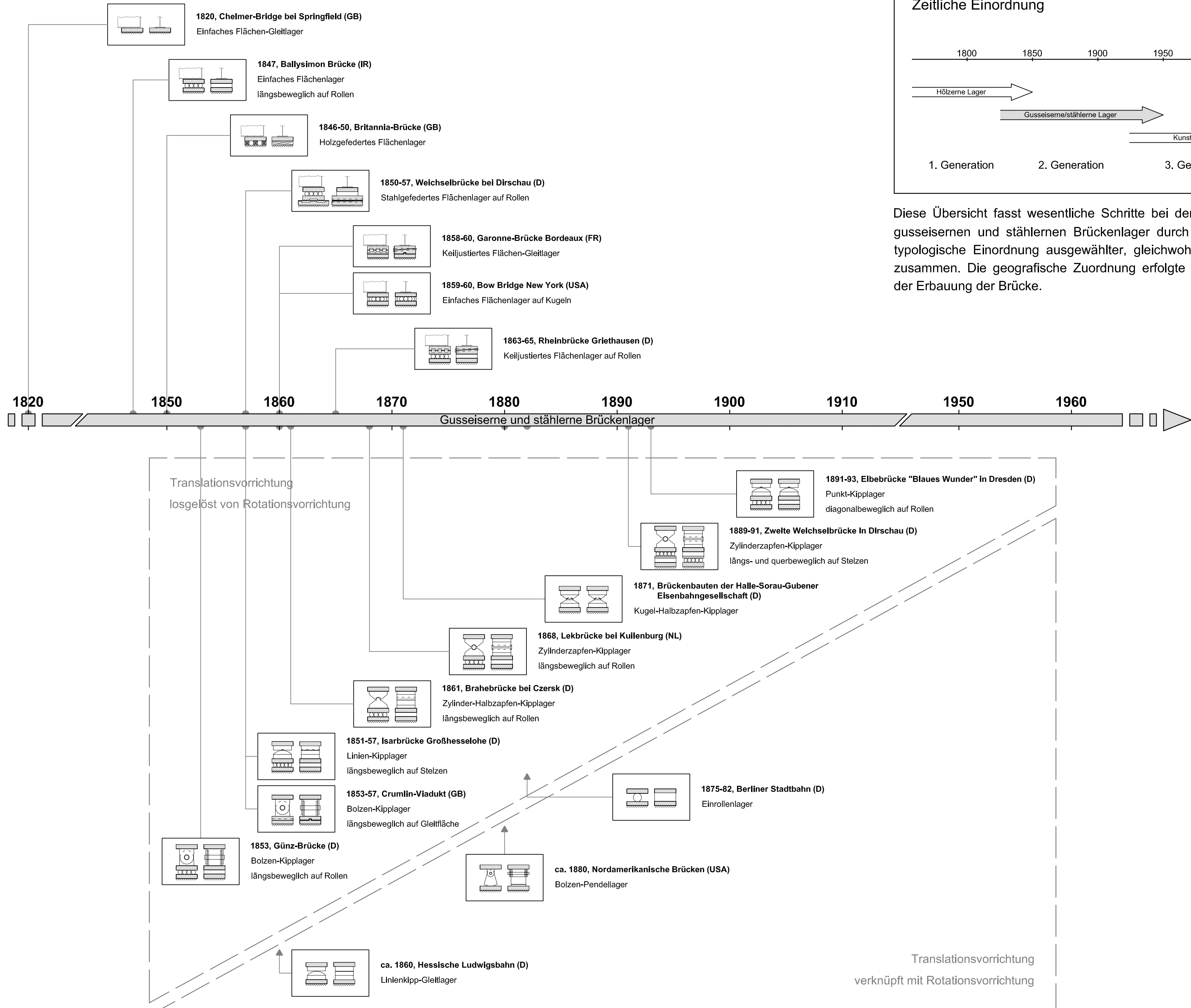
Dieser Arbeit liegen zwei Übersichten im Format A2 bei:

Übersicht 1: Chronologie der gusseisernen und stählernen Brückenlager

Übersicht 2: Typologie der gusseisernen und stählernen Brückenlager.

FLÄCHENLAGER

KIPPLAGER



ROTATION

		konstruktiv nicht vorgesehen (Flächenlager)					konstruktiv vorgesehen (Kipplager)												
		einfach	justierbar		gedefert		Bolzen	Berührungs- (Tangential-)			Halbzapfen		Zapfen						
			Schraube	Keil	Holz	Stahl		Linie	Punkt	Zylinder	Kugel	Zylinder	Vollzapfen	Kugel					
TRANSLATION	beweglich	fest																	
		Gleiten																	
		Rolle																	
		Wälzen																	
TRANSLATION	fest	Isoliert von Rotationsvorrichtung																	
		Wälzen																	
		Kugel																	
		Pendel																	
TRANSLATION	beweglich	Isoliert von Rotationsvorrichtung	Konstruktiv nicht möglich!																
		Gleiten																	
		Rolle																	
		Wälzen																	
TRANSLATION	fest	Pendelstab	Konstruktiv nicht möglich!																
		Gleiten																	
		Rolle																	
		Wälzen																	
TRANSLATION	beweglich	Pendelstab	Konstruktiv nicht möglich!																
		Gleiten																	
		Rolle																	
		Wälzen																	

Hinweis:
 Innerhalb der Brückenlager stellen die Pendelstablager eine randständige Ergänzung dar. Aus konstruktiver Sicht besteht ein Pendelstablager aus zwei separaten Lagern mit einer zwischengeschalteten Pendelstütze. Unter Umständen, z.B. bei sehr kurzem Pendelstab, kann diese Einheit jedoch als eigenständiges Lager - als Pendelstablager - bezeichnet bzw. verstanden werden.
 Auch aus statischer Sicht unterscheiden sich Pendelstablager von den oben aufgeführten Lagerarten, welche bei beweglicher Ausführung - die Reibung vernachlässigt - ausschließlich Vertikalkräfte in den Unterbau eintragen. Bei Pendelstablager hingegen ergibt sich planmäßig eine zusätzliche Horizontalkomponente.