

LIF Leipziger
Instandhaltungsforum

8./9. November 2017

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Otto Edel (Brandenburg an der Havel)

Aus Schaden wird man klug!

Zwei Jahrhunderte Bemühungen
um die Sicherheit des Schienenverkehrs

*Der Fachvortrag wurde gehalten im Rahmen des
LIF Leipziger Instandhaltungsforum 2017.*

Dieses Forum wird jährlich durch

IFTEC GmbH & Co.KG

Tesla-Str. 2

04347 Leipzig

ausgerichtet.

Nähere Informationen auf www.iftec.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Otto Edel (Brandenburg an der Havel)

Aus Schaden wird man klug!

Zwei Jahrhunderte Bemühungen um die Sicherheit des Schienenverkehrs

Leipziger Instandhaltungsforum, 8./9. November 2017

1. Versagensfälle der Frühzeit der Eisenbahnen

Die Eisenbahn als Transportmittel existierte schon einige Zeit bevor von einem (öffentlichen) Eisenbahnwesen im heutigen Sinn gesprochen werden konnte. Die ersten Informationen über das Versagen von Gleisanlagen stammen noch aus der Zeit vor der eigentlichen Eisenbahn. Einer der spektakulärsten Versagensfälle dieser Voreisenbahnzeit ereignete sich 1808, als RICHARD TREVITHICK seine Lokomotive „Catch me who can“ in London einer breiten Öffentlichkeit vorstellte (Bild 1), indem er sie mit einem angehängten Wagen auf einer Kreisbahn fahren ließ. Bei der Vorführung brach eine Schiene, die Lokomotive überschlug sich und die Vorführung dieser neuen Technik war damit vorerst beendet. [1]

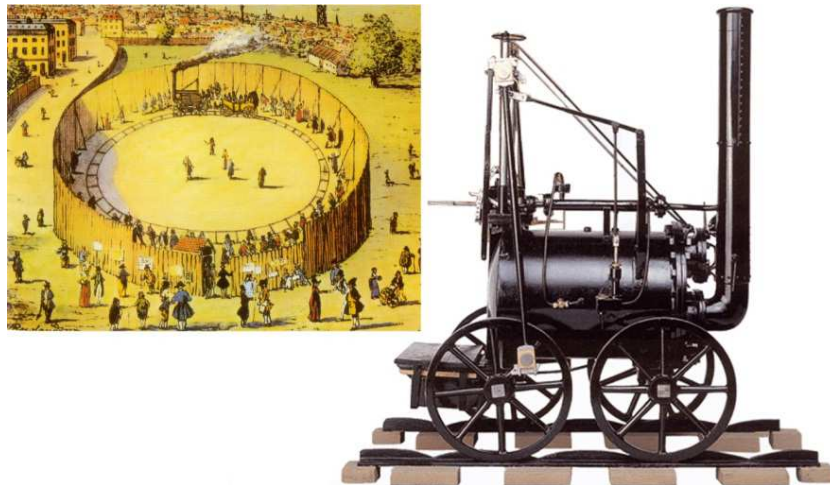


Bild 1: Auf einem Rundkurs [2] verunglückte 1808 durch einen Schienenbruch die vierte, mit dem Namen „Catch me who can“ versehene Lokomotive [1] des englischen Technikers RICHARD TREVITHICK.

Wenn auch nicht überliefert ist, in welcher Art im Jahre 1808 die gußeiserne (Winkel)Schiene zerstört wurde, so brachen damals die Schienen zweifellos in der Mitte unter der größten Biegebeanspruchung durch, weswegen als Abhilfe die in der Mitte stärkeren Fischbauchschiene verwendet wurden, und die Winkelschiene einen ebenfalls in der Mitte höheren Winkelsteg

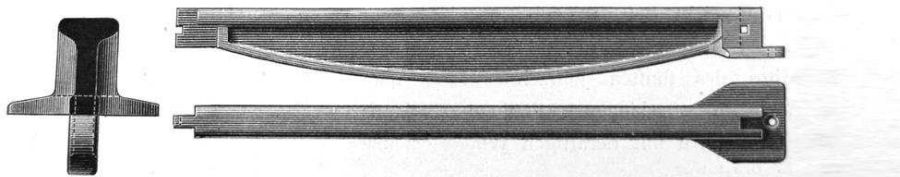


Bild 2: Konstruktion der Fischbauchschiene mit Veränderung des Schienenquerschnitts, der Lagerung der Schiene an ihrem Ende und der Verbesserung der Stabilität der Fahrkante. (nach Darstellungen von HAARMANN. [3])

erhielten. Eine andere Art des Versagens war durch das Abbrechen der Auflageplatten am Ende der drei Fuß langen Schienen (Bild 2) möglich. Als konstruktiv bessere Variante erhielten die Schienen als Lager sogenannte Schienenstühle, in denen die Schienenenden mit je

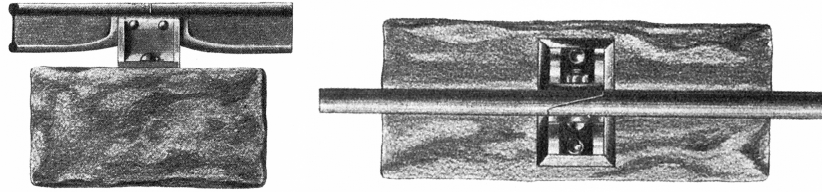


Bild 3: Unterschiedliche Befestigungen der Enden der Gußschienen in Schienenstuhl. [3]

einem Bolzen oder mit einem gemeinsamen Bolzen befestigt wurden (Bild 3), so daß die Schienenenden sich unter der Radlast frei deformieren konnten.

Wenn die drei Fuß lange und in der Mitte verstärkte Gußeisenschiene sich in der Praxis besser bewährten als die Schiene mit konstantem Profilquerschnitt, so war es eine klare Fehlentscheidung der zuständigen Eisenbahngesellschaft für die Strecke Stockton-Darlington, von Birkinshaw zu verlangen, daß die ersten aus Puddeleisen gewalzten Eisenbahnschienen bei einer Länge von 15 Fuß ebenfalls die „bewährte Fischbauchform“ mit einem verminderten Querschnitt in den Lagerstellen haben sollten (Bild 4). Die Schwächung des Querschnitts gerade an den Lagerpunkten durch die nachträgliche Bearbeitung der gewalzten, 15 Fuß langen Schiene mit ursprünglich konstantem Querschnitt ist der Beanspruchung der Schiene als Durchlaufträger jedoch nicht angemessen.

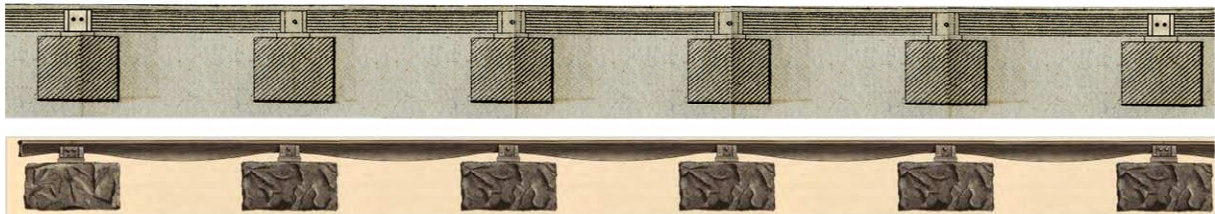


Bild 4: Die mehrere Lagerpunkte überbrückende gewalzte Schiene als Durchlaufträger nach der Wiedergabe in BIRKINSHAWs Patentschrift von 1820 (oben, nach [4]) und die Verwirklichung auf der Strecke von Stockton - Darlington (unten, nach [3]).

Ein aus den USA bekannter Schienenfehler ergab sich aus der Notwendigkeit, statt teurer britischer Importe eigene Produkte in Form von Flachschiene zu verwenden. Diese nach heutigem Maßstab recht kurzen Schienen mit 12 mm bis 15 mm Dicke wurden auf die hölzernen Längsschienen genagelt. Unter der Wirkung der Räder verformten sich diese Schienen plastisch und versuchten, sich nach oben zu krümmen bzw. von der Unterlage abzuheben. Die Nägel hielten den abhebenden Momenten oftmals nicht stand, so daß sich die Schienenenden nach oben abhoben und die als „snake heads“ bezeichneten Schienenfehler darstellten (Bild 5). Bei ausreichender Höhe bohrten sich diese Schienenenden durch den hölzernen Fußboden der Wagen und verursachten mehrfach Bahnbetriebsunfälle mit Toden. Diese amerikanische Gleiskonstruktion wurde auch auf der Strecke Leipzig-Wurzen angewendet. Als Mittel gegen das Abheben der Schienenenden wurden diese später mit Schrauben und Muttern auf den Holzschwellen befestigt.

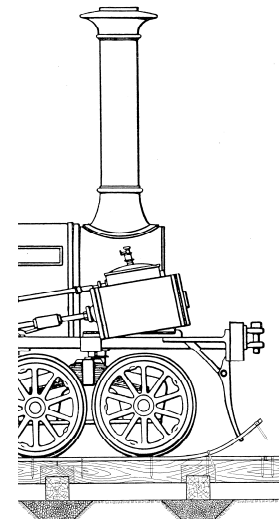
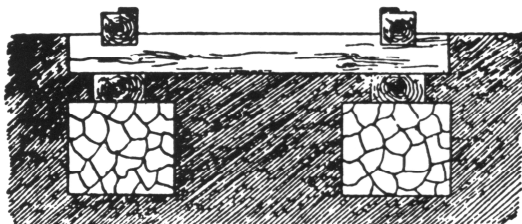


Bild 5: Amerikanisches Holzlangschwelligleis mit Flachschiene (links [3]) und schematische Darstellung der sich infolge der plastischen Verformung durch die Fahrzeugräder abhebenden Flachschieneenden (rechts [5]).

Ist bei den Schienen und ihren Profilquerschnitten in der Anfangszeit des Eisenbahnwesens eine große Vielfalt zu konstatieren, so gab es auch bei den Weichenkonstruktionen wesentliche Unterschiede. Neben den heute üblichen Zungenschienen wurden auch Schlepplweichen verwendet. Wie aus den Darstellungen im Bild 6 zu erkennen ist, haben die Schlepplweichen einen gravierenden Nachteil: Fährt der Zug von einem Zweiggleis auf das Stammgleis und ist die Weiche nicht ordnungsgemäß gestellt, so kommt es zu einer Entgleisung des Fahrzeugs. Bei Zungenschienen ist diese Gefahr nicht gegeben, da sich die Zungen dann automatisch umstellen. Etwa ab der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden Schlepplweichen im Eisenbahnwesen nicht mehr genutzt.

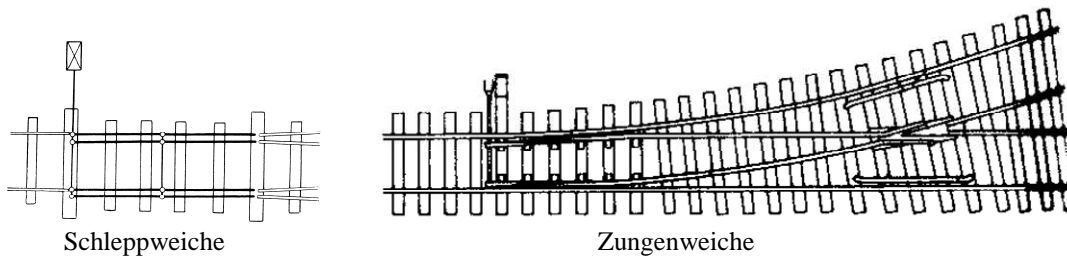


Bild 6: Im Eisenbahnwesen verwendeten Weichen: links Schlepplweiche [6], rechts Zungenweichen [7].

Haben die Nachteile der Schlepplweichen dazu geführt, daß diese Konstruktionen recht schnell aus dem Eisenbahnwesen verschwanden, so ist es verblüffend feststellen zu müssen, daß die Schlepplweiche beim Transrapid (Bild 7) fröhliche Urständ feierte. Gab es bei dieser Hochtechnologie keine bessere Lösung? Waren die Erfahrungen der frühen Eisenbahnen vollkommen in Vergessenheit geraten?



Bild 7: Transrapid-Weiche [8]

2. Der Einzug der Wissenschaften in die Eisenbahntechnik

Eine erste erwähnenswerte, als wissenschaftlich zu bezeichnende Untersuchung des Gleissystems der Eisenbahn erfolgte durch **PETER BARLOW** (Bild 8). In seinen Ausarbeitungen „*First and second Report to the Directors of the London- and Birmingham-Railway*“ vom März bzw. Oktober 1835 legte er seine Erkenntnisse nieder: [3]

- Die Widerstandsfähigkeit einer befahrenen Eisenbahnschiene müsse mindestens doppelt so groß sein, wie sie für die gleichgroße ruhende Belastung als erforderlich angesehen werde (bedingt durch die Dynamik des bewegten Fahrzeuges).
- Die Durchbiegung der Schienen am Stoß ist zwei- bis dreimal so groß wie an den übrigen Stellen (infolge der unterschiedlichen Biegesteifigkeit der Schienenenden und der unterschiedlichen Dynamik der Radkräfte).
- Schienen mit parallelen Linien von Kopf und Fuß, d.h. mit konstantem Querschnitt, sind vorzuziehen (gegenüber der „Fischbauchschiene“).
- „Sehniges Schweißisen“ zeigt bei biegebedingtem Zug und Druck gleiche Widerstandsfähigkeit (anders als das zuvor verwendete Gußeisen).



Bild 8: Peter Barlow, FRS, (1776-1862) [9]

Im Rahmen seiner grundlegenden Betrachtungen zur „Elastizität und Festigkeit“ statisch bestimmt gelagerter Träger sowie auch von Durchlaufträgern publizierte **EMIL WINKLER** (Bild 9) 1868 für die auf Langschwelen verlegten Schienen seine Theorie, nach der die Bettungsreaktion proportional der Durchbiegung der Schiene ist (Bild 9). [10]

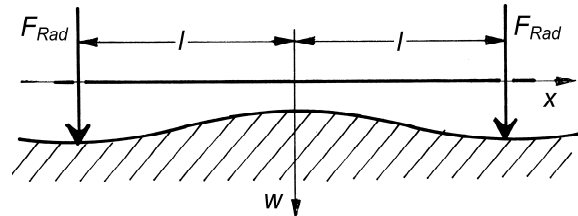
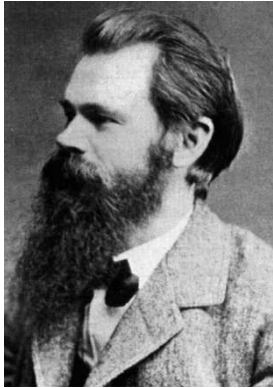


Bild 9: Emil Winkler (1835 - 1888) [11], der Umschlag seines Buches [12] und WINKLERs Modell zur Berechnung einer nachgiebig gelagerten Schiene unter der Beanspruchung periodisch verteilter Radkräfte im Abstand von jeweils $2 \cdot l$ [10].

Bei der Bestimmung der Beanspruchung der auf Querswellen gelagerten Schienen setzte WINKLER in einer späteren Arbeit abweichend von seiner früheren Annahme der nachgiebigen Lagerung voraus, daß die Schwellenlagerung in vertikaler Richtung unnachgiebig ist mit der Folge, daß die Schienenbeanspruchung zwischen der Beanspruchung frei aufliegender und fest eingespannter Schienen liegt. **HERMANN ZIMMERMANN** (Bild 10), von dem auch die ursprüngliche Kuppel des Berliner Reichstagsgebäude stammt, publizierte basierend auf den Annahmen von WINKLER 1888 seine grundlegende Arbeit „Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues“ [14], wobei die Laschenverbindungen (Bild 11) als Schwachstelle der Eisenbahnleiße in die Betrachtungen einbezogen wurden. [15]

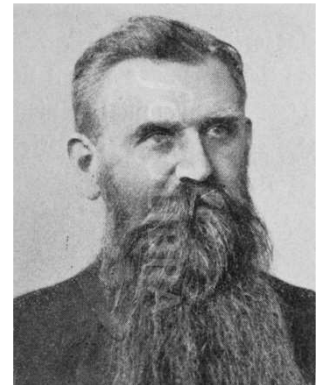


Bild 10: Hermann Zimmermann (1845 - 1935). [13]

Während sich das Interesse an der Beanspruchung der Schienen seit Jahrzehnten auf den mittleren Bereich der Schienen konzentriert, so daß der Einfluß der gelaschten oder gebrochenen Schienenenden unbeachtet bleibt, analysierte ZIMMERMANN schon 1888 in seiner grundlegenden Abhandlung [14] den Fall einer durch eine Einzelkraft am Ende beanspruchten Schiene. Abgesehen von dem Umstand, daß ZIMMERMANN

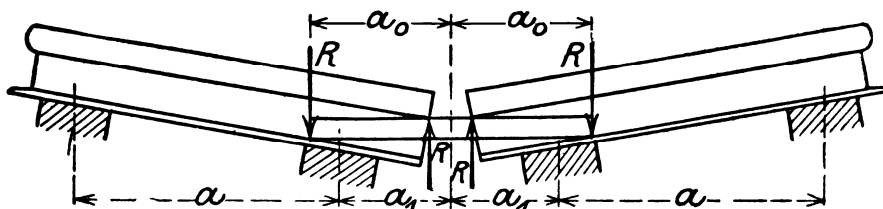


Bild 11: Berechnungsmodell von ZIMMERMANN für die Laschenverbindungen der Eisenbahnschienen. [7]

als Parameter der mathematischen Lösung nicht den sogenannten Grundwert L des Langschwelenoberbaus berücksichtigte, sondern dessen Kehrwert als κ , so sind die Funktionsverläufe der Durchbiegung, des Biegemomentes und der Querkraft im Bild 12 wiedergegeben. Verglichen mit der üblichen Lösung der maximalen Durchsenkung der Schiene am Aufstandspunkt des Rades tritt am Schienenende eine Vervierfachung der üblichen Durchsenkung unter dem Rad ein.

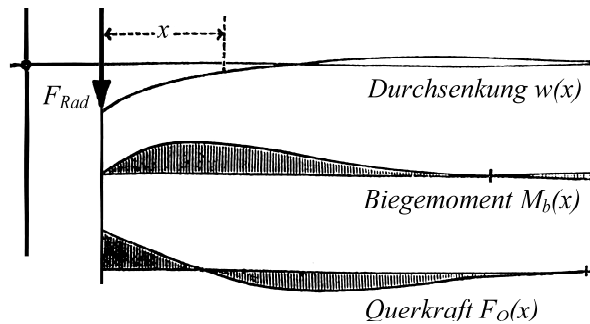


Bild 12: Die Durchbiegung sowie der Verlauf des Biegemomentes und der Querkraft beim Angriff einer vertikalen Radkraft am Ende einer einseitig unendlichen, elastisch gebetteten Eisenbahnschiene (nach ZIMMERMANN [14] mit angepaßten Bezeichnungen, aber beibehaltener, umgekehrter Vorzeichenregelungen).

Möglicherweise infolge der Gestaltung der Eisenbahngleise mit lückenlos miteinander verschweißten Schienen wird in den aktuellen Oberbauberechnungen der DEUTSCHEN BUNDESBAHN [16] von 1992 der Beanspruchung weder der gelaschten Schienenenden noch der freien Schienenenden (am Bruch) irgendwelche Beachtung geschenkt, obwohl auf Laschenverbindungen auch beim lückenlosen Gleis nicht generell verzichtet werden kann. Und Schienenquerbrüche treten gelegentlich auch noch auf.

AUGUST WÖHLER (Bild 13) studierte in Hannover und wurde nach einer Tätigkeit bei Borsig und der Königlich Hannöverschen Eisenbahn 1847 Obermaschinenmeister bei der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn. Durch die Verstaatlichung dieser Bahn 1852 wurde er 1854 Königlich-Preußischer Obermaschinenmeister. WÖHLER wurde 1855 zusammen mit Professor Schwarz von der Berliner Bauakademie, später eigenständig beauftragt, die Ursachen der bei Eisenbahnfahrzeugen aufgetretenen Achsbrüche klären.



Bild 13: August Wöhler (1819 - 1914) [17] und Straßenschild im GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht.

Seine Untersuchungen plante WÖHLER als Dauerversuche. Bemerkenswert ist es aus heutiger Sicht, daß entsprechende Apparaturen und Prüfmaschinen für derartige Untersuchungen nicht verfügbar waren, so daß er selbst seine Konstruktion entwerfen und bauen (lassen) mußte.

Seine Untersuchungsergebnisse an Achsen von Schienenfahrzeugen publizierte WÖHLER ab 1858:

- August Wöhler: Bericht über die Versuche, welche auf der Königl. Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn mit Apparaten zum Messen der Biegung und Verdrehung von Eisenbahnwagen-Achsen während der Fahrt angestellt wurden. Z. Bauwes. **8** (1858), Sp. 641 - 652.
- August Wöhler: Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagen-Achsen einwirkenden Kräfte und der Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen. Z. Bauwes. **10** (1860), Sp. 583 - 616.
- August Wöhler: Über die Versuche zur Ermittlung der Festigkeit von Achsen, welche in den Werkstätten der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d.O. angestellt sind. Z. Bauwes. **13** (1863), Sp. 233 - 258.

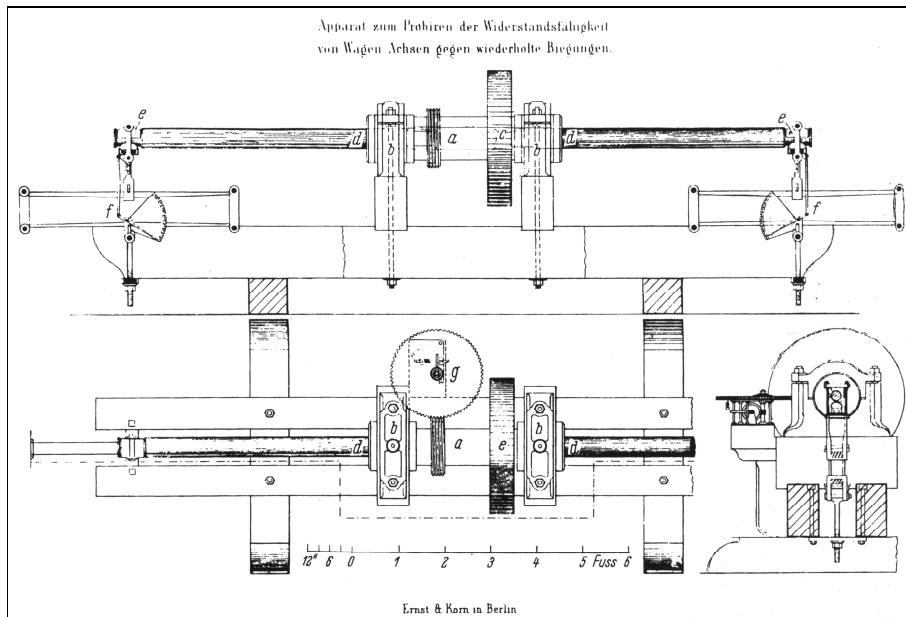


Bild 14: Vorrichtung zur Umlauf-Wechselprüfung von zwei Eisenbahnachsen nach Wöhler. [17]

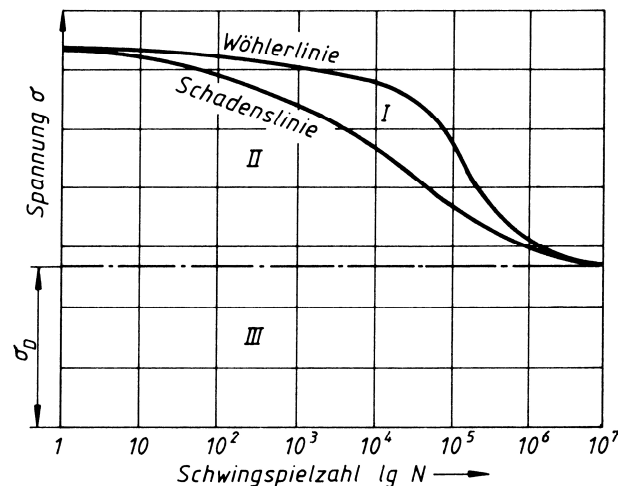


Bild 15: Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen / Werkstoffproben unter zyklischer Einstufenbeanspruchung. [18]

Heute gehört es zum ingenieurtechnischen Grundwissen, daß sich Bauteile unter statischer Last und gleichgroßer schwingender Beanspruchung mit gleicher Maximalbeanspruchung sehr unterschiedlich verhalten.

3. Der Einsturz der Eisenbahnbrücke von Münchenstein 1891 [19]

Der Bau der Eisenbahnbrücke über die Birs bei Münchenstein, 5 km entfernt von Basel in der Schweiz, wurde 1874 begonnen und 1875 vollendet. Die Eisenkonstruktionen für das Bauwerk mit einer Spannweite von 42 m wurden durch die Werkstätten von **GUSTAVE EIFFEL** geliefert, der gemäß den Vertragsbedingungen Änderungen der ursprünglichen Konstruktion vornehmen durfte und realisierte.

Durch Hochwasser der Birs im September 1881 wurde unterhalb der Brücke ein Wehr weggerissen.

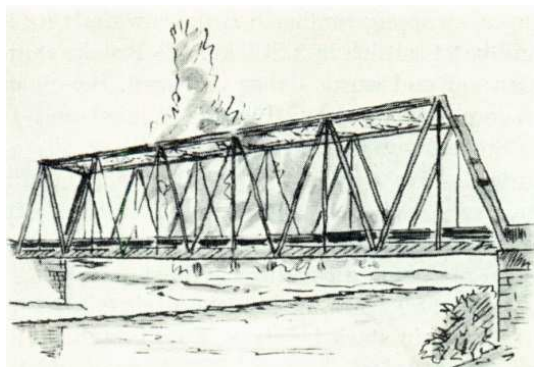


Bild 16: Ansicht der Birsbrücke bei Münchenstein [19]

Die dadurch verstärkte Strömung verursachte eine Sohlenvertiefung, durch die ein Brückenwiderlager stark beschädigt und die Brücke verbogen wurde. Beschädigte Stellen wurden nur notdürftig repariert. 1890 wurde das Tragwerk durch die Berner Firma Probst, Wolf und Chappuis verstärkt, um den erhöhten Verkehrsbeanspruchungen gewachsen zu sein. Belastungsproben wurden aber nicht für nötig befunden und auch nicht durchgeführt.

Am 14. Juni 1891 fand in Münchenstein ein Sängersfest statt, zu dem viele Teilnehmer mit dem Zug anreisten. Unter der Belastung durch den Zug „brach die Brücke nach einigen Schwankungen langsam ein“. Das Unglück forderte 75 Todesopfer und 130 Verletzte.



Bild 17: Die 1891 zerstörte Eisenbahnbrücke bei Münchenstein. [20]

Zur Begutachtung wurden die Professoren **WILHELM RITTER** und **LUDWIG TETMAJER** (E.T.H. Zürich), die französischen Professoren E. Collignon und E. Hausser und seitens der Basler Behörden Ing. Conrad Zschokke und der deutsche Professor Leonhard Seifert von Duisburg herangezogen. Neben den Gutachten erschienen in Fachzeitschriften Abhandlungen zu den Ursachen des Brückeneinsturzes. Einige Vertreter der Ingenieurwissenschaften (Bild 18), die sich mit dem technischen Versagensfall auseinandersetzten und auch heute noch einen bedeutenden Namen haben und nicht vergessen wurden, sind nachfolgend angeführt.



Wilhelm Ritter [21] Ludwig Tetmajer [22] Friedrich Engesser [23] August Föppl [24] Heinrich Gerber [25]

Bild 18: Sie setzten sich fachlich mit dem Brückeneinsturz von Münchenstein auseinander.

Faßt man die Ansicht fast aller Experten zusammen, so liegt die Hauptursache des Einsturzes in der mangelhaften Konstruktion der Brücke, der ungenügenden oberen Querabsteifung.

WILHELM RITTER (E.T.H. Zürich) äußerte sich wie folgt: „Das Augenmerk ist zu richten auf elastische und plastische Durchbiegungen; keine bandförmigen Streben, besonders dort nicht, wo Wechselbeanspruchungen auftreten; Belastungsproben sind immer durchzuführen, schon um die Laien zu beruhigen; nicht jeder Bauschlosser, der sein Geschäft ausdehnen will, soll eine Brücke bauen dürfen.“

AUGUST FÖPPL (Universität Leipzig) schrieb: „Die Brücke ist nämlich deshalb eingestürzt, weil sie, als räumliches Fachwerk betrachtet, labil war und nicht hinreichend gegen schwingende Bewegungen des Obergurtes geschützt war. Es ist ungerechtfertigt, sich bei der Behandlung der Fachwerktheorie auf ebene Fachwerke zu beschränken. Unsere Fachwerke sollen sich im dreidimensionalen Raum bewähren und es genügt daher nicht, sie ausschließlich nach den hergebrachten Methoden der ebenen Fachwerktheorie zu behandeln.“

Das Gutachten der französischen Professoren **COLLIGNON** und **HAUSSER** wurde von allen übrigen Experten abgelehnt, da es eine reine Rechtfertigungsschrift für die französische Lieferfirma Eiffel darstellte. Anzumerken ist, daß zwei Jahre vor dem Unglück von Münchenstein der Eiffelturm in Paris fertiggestellt worden war.

Ausgehend von dem Brückeneinsturz von Münchenstein wurden Betrachtungen zur Konstruktion und Stabilität angestrengt. Als fast wichtiger ist es aber anzusehen, daß in der Folge dieses Unglücksfalles eine „**Verordnung betreffend der Berechnung und Prüfung der eisernen Brücken- und Dachkonstruktionen auf den schweizerischen Eisenbahnen**“ [26] am 19. August 1892 in Kraft gesetzt wurde, die die folgenden Problemkreise regelte:

1. Grundlagen der statischen Berechnung
2. Zulässige Materialbeanspruchung
3. Materialbeschaffenheit
4. Erstmalige Untersuchung von Eisenbahnbrücken
5. Periodische Untersuchung der Eisenbahnbrücken
6. Führen eines Brückenbuches
7. Untersuchung von Straßenbrücken
8. Behandlung bestehender Konstruktionen.

Gegenwärtig sind zur Vermeidung rißartiger Schäden in Brückenkonstruktionen verschiedene ingenieurtechnische Vorschriften zu beachten, so zum Beispiel die Vorschriften der Eisenbahnen für den Bau und die Unterhaltung von Brücken, nationale und internationale Stahlbauvorschriften usw.

4. Die Entwicklung der Bruchmechanik als technische Wissenschaft

Neben Verschleiß und Korrosion sind die Bildung von Rissen, das Rißwachstum und der Bruch die bedeutsamsten Versagensformen mechanisch beanspruchter Konstruktionen. Die Auswirkungen rißartiger Fehler in Bauteilen lassen sich mit den Methoden der Bruchmechanik analysieren. Den ersten Anstoß zur Untersuchung der Wirkungen von Rissen in mechanisch beanspruchten Bauteilen gab 1907 **KARL WIEGHARDT** (1874 – 1924) durch die weltweit erste Abhandlung [27] über ein Rißproblem mit dem Titel „*Über das Spalten und Zerreißen elastischer Körper*“ [28]. Diese Arbeit blieb jedoch lange Zeit weitgehend unbeachtet. Als Grund dafür führt der wie **WIEGHARDT** in Wien als Professor tätige **ROSSMANITH** [29] u.a. an, daß diese Veröffentlichung ein singuläres Ereignis gewesen sei und es um 1907 nicht zu spektakulären Versagensfällen gekommen war, an deren Aufklärung die Industrie ein Interesse gehabt hätte. Erst 1995 publizierte **ROSSMANITH** die Arbeit Wieghardts in englischer Übersetzung [30] mit einer Einführung in der Zeitschrift *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Welche Langzeitwirkung diese Initiative haben wird, bleibt abzuwarten.

Angesichts der unendlich großen Spannungen im Punkt der Rißspitze bei linear-elastischem Werkstoffverhalten lenkte **WIEGHARDT** das Interesse auf die Verteilung der Spannungen in der Nähe der Rißspitze. Aus ihr leitete er ab, daß sich ein Riß bei sprödem Werkstoffverhalten gemäß der Normalspannungshypothese in seiner bisherigen Richtung weiter ausbreitet, wobei der Bruch des Materials im Punkt der Rißspitze einsetzt. Da jedoch die Spannungen bei noch so geringer äußerer Belastung an der Rißspitze unendlich groß werden, gelang es ihm nicht, eine Aussage darüber zu gewinnen, bei welcher äußeren Belastung der Bruch einsetzt. **WIEGHARDT** vertrat die Auffassung, daß für das Einsetzen des Bruchs nicht die Größe der Spannungen in einem bestimmten Punkt, sondern die resultierenden Spannungen über eine kurze Strecke im Bereich der Rißspitze als maßgebend für das Versagen anzusehen seien. Diese Vorstellung wurde später durch **IRWIN** in Form der Spannungsintensitätsfaktoren umgesetzt.

Zur Charakterisierung der Werkstoffbeanspruchung an Rissen in Glas verwendete **ALAN ARNOLD GRIFFITH** (1893 – 1963) neben der Deformationsenergie des elastischen Körpers die von Flüssigkeiten her bekannte Oberflächenenergie. Die Arbeit von WIEGHARDT war, wie ROSSMANITH zutreffend bemerkt, ein singuläres Ereignis, dem keine weiteren Arbeiten folgten. Anders war es bei GRIFFITH, der seiner ersten Publikation von 1920 „*The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*“ [31] eine zweite folgen lassen konnte [32] und seine Erkenntnisse auf dem *Ersten Internationalen Kongress für Angewandte Mechanik* 1924 in Delft einer breiten Öffentlichkeit vorstellte. Der Grund für die auch heute noch bemerkenswerte Unkenntnis der Wieghardtschen Veröffentlichung von 1907 im angelsächsisch dominierten Wissenschaftsbereich ist nicht zuletzt in der generellen gesellschaftlichen, insbesondere auch der institutionellen Mißachtung anderer als der englischen Sprache als Sprache der Wissenschaft zu sehen.

In den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts hatte sich die Bruchmechanik insbesondere durch das Wirken von **GEORGE RANKINE IRWIN** (1907 - 1998) als eigenständiger Bereich der technischen Wissenschaften zwischen der technischen Mechanik und der Werkstofftechnik etabliert. Ausgehend von der Energiebilanz in Abhängigkeit von der Rißvergrößerung gelingt ihm die Bestimmung der bruchauslösenden Beanspruchung. IRWIN prägte basierend auf Energiebetrachtungen den Begriff der Energiefreisetzungsrate, die vereinfachend auch als „Rißvergrößerungskraft“ bezeichnet wird; zur Charakterisierung der Größe der Beanspruchung werden in der linear-elastischen Bruchmechanik üblicherweise die ebenfalls von IRWIN [33] eingeführten Spannungsintensitätsfaktoren verwendet, die sich - damals allerdings in etwas anderer Normierung - aus dem Produkt einer nominellen Spannung mit einem von der Rißgröße abhängigen Ausdruck nach gegenwärtiger Normierung ergeben gemäß

$$K_I = \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$$

wobei mit Hilfe des dimensionslosen Faktors Y die Einflüsse der Bauteil- und der Rißgeometrie sowie die geometrische Verteilung der nominellen Spannungen in größerer Entfernung vom Riß berücksichtigt werden. Mit dem Buchstaben a wird die für den jeweils betrachteten Fall charakteristische Rißabmessung bezeichnet.

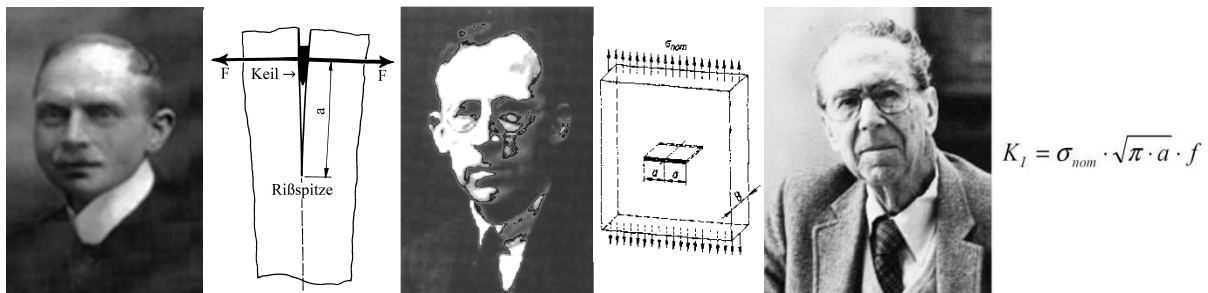


Bild 19: Die Wegbereiter der Bruchmechanik: WIEGHARDT - GRIFFITH - IRWIN

Karl Wieghardt (* 1874, † 1924) und eines der von ihm 1907 untersuchten Rißprobleme,

Alan Arnold Griffith (* 1893, † 1963) und das Modell des Griffith-Risses,

George Rankine Irwin (* 1907, † 1998), Spannungsintensitätsfaktor als Maß der Rißfrontbeanspruchung.

Seitens der etablierten Mechaniker wurde die Bruchmechanik nicht in jedem Fall als vollwertige Wissenschaftsdisziplin angesehen [34]. **HEINZ NEUBER**, Autor der berühmten Monographie „Kerbspannungslehre“ und Professor an den Technischen Hochschulen Dresden und München, brachte seine grundlegende Skepsis gegenüber der Bruchmechanik in der 3. Auflage seines Buches 1985 auf der Seite 5 mit den folgenden Worten zum Ausdruck: [35]

„... Die so als Sonderfall der Kerbspannungslehre definierte Rißtheorie führt nach Einführung des Stoffteilchens von der Breite ρ^* auf eine Bruchtheorie mit den drei Parametern ρ , ρ^* und der Spannung, die an der Rißspitze auftritt. Die so entstehende Bruchtheorie ist daher mehrparametrig. Die „Bruchmechanik“ („fracture ,mechanics“) stützt sich dagegen in ihrer Bruchprognose im wesentlichen auf den Grenzwert K_c des Spannungsintensitätsfaktors [1.24]. Bei der experimentellen Bestimmung von K_c , die inzwischen in den USA und in Japan mit erheblichem Aufwand durchgeführt worden ist, stellen sich, wie zu erwarten war, nicht unerhebliche Streuungen heraus. Dennoch gewann die Bruchmechanik an Beachtung, nachdem viele Mathematiker in dieser Disziplin ein neues Feld für die Anwendung der Methoden der Integraltransformation entdeckt zu haben glaubten.“

Mit dieser Feststellung wurde die Bruchmechanik als Spielwiese der Mathematik abgegrenzt. Weiter führte NEUBER aus: „Darüber hinaus darf nicht übersehen werden, daß die ‚Bruchmechanik‘ auf einer Überbewertung der linearen Elastizitätstheorie beruht.“ Eine gewisse Verärgerung könnte herausgelesen werden, daß der simplifizierenden Bruchmechanik gegenüber seiner umfassenderen Kerbspannungslehre in gewisser Weise der Vorzug gegeben wird. Ähnlich geringschätzig wurde am Ende der 1960er Jahre auch die sich etablierende Methode der Finiten Elemente betrachtet, da sie ja „nur ein Näherungsverfahren“ sei. Anzumerken ist aber, daß im Umfeld von NEUBER der Bruchmechanik doch eine gebührende Beachtung geschenkt wurde, was sich u.a. durch die Habilitation von **HANS GEORG HAHN** mit dem Titel „Spannungsverteilung an Rissen in festen Körpern – Vergleichende Betrachtung der in der Bruchmechanik verwendeten Rißmodelle“ [36] sowie dessen Buch „Bruchmechanik – Einführung in die theoretischen Grundlagen“ [37] belegt ist.

Daß es im Zusammenhang mit Rissen vorkommt, daß zwar Meinungen ausgetauscht werden, aber doch aneinander vorbeigeredet wird, zeigt ein Erlebnis, über das **WERNER GILDE**, Direktor des Zentralinstituts für Schweißtechnik in Halle an der Saale, berichtete: [38]

Zusammenkünfte über Forschung und Entwicklung sollen eine Abwägung der Möglichkeiten sein.

Auch die Bezeichnung Meinungsstreit, die häufig benutzt wird, trifft selten den Kern der Sache. Wenn Meinungen aufeinanderprallen, liegen zu wenig Zahlen vor.

Auf einem Kolloquium über Atomreaktoren äußerte ein Kollege aus der BRD: „Im Containment sind immer Risse, und wir müssen damit leben.“ Daher, so schlußfolgerte er, brauchen wir Meßmethoden, um diese Risse zu verfolgen. Ich erwiderte in der Diskussion: „Aufgabe der Schweißtechnik ist es, fehlerfreie Bauwerke herzustellen. Das gilt auch und besonders für das Containment als Sicherheitshülle bei einem Reaktorunfall.“ Das war meine Meinung.

Doch vor etlichen Jahrzehnten hatte sich die Bruchmechanik als eigenständiger Bereich der technischen Wissenschaften zwischen der technischen Mechanik und der Werkstofftechnik bleibend etabliert. Mit Einführung des Spannungsintensitätsfaktors als neues Maß für die Größe der Werkstoffbeanspruchung lassen sich viele ingenieurtechnische Erfahrungen, die auf der Grundlage des bewährten Beanspruchungsmaßes „Spannung“ als die pro Flächeneinheit übertragene Kraft gesammelt wurden, auch auf rißgeschädigte Bauteile übertragen.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Bruchmechanik ist stets die reale oder als wahrscheinlich angenommene Existenz rißartiger Fehler. Trotz anfänglicher Skepsis ist die Bruchmechanik als Mittel zur Analyse des Ausbreitungsverhaltens von Rissen in mechanisch, thermisch und korrosiv beanspruchten Bauteilen mittlerweile unverzichtbar geworden. Zu den gegenwärtig von der Bruchmechanik behandelten Rißausbreitungsphänomenen gehören:

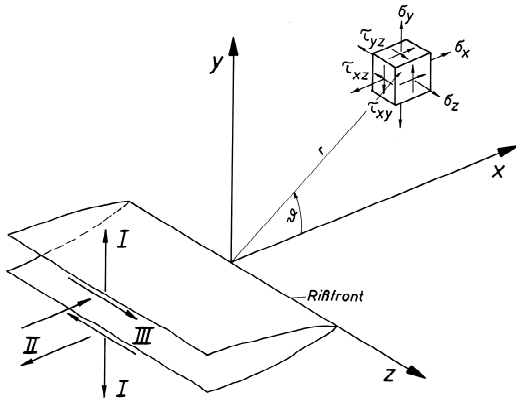
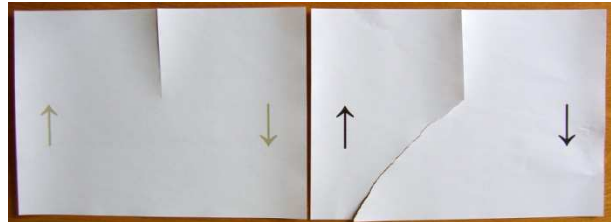


Bild 20: Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen den Normal- und Schubspannungen σ bzw. τ im Rißspitzenbereich und den Rißöffnungsarten I, II und III der Bruchmechanik.

- die Dauerfestigkeit rißbehafteter Konstruktionen,
- das stabile Rißwachstum durch Schwingbeanspruchung, Spannungsrißkorrosion und Kriechen,
- die Auslösung der instabilen Rißausbreitung, d.h. des Bruchs,
- die Analyse der Phase der instabilen Rißausbreitung einschließlich der Verzweigung schnell laufender Risse,
- die Arretierung schnell laufender Risse.



vorher nachher

Bild 21: Ablenkung des kritischen Risses von der ursprünglichen Richtung bei Schubbeanspruchung.

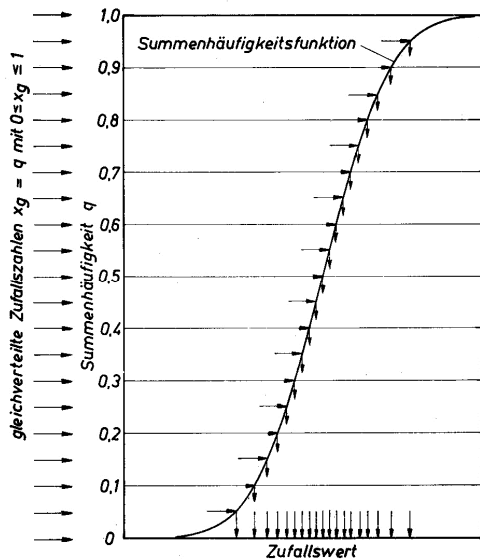


Bild 22: Schema zur Erzeugung von Zufallswerten vorgegebener Wahrscheinlichkeit.

Meistens im Zusammenhang mit aufgetretenen Schadensfällen werden an die untersuchende Institution Fragen der folgenden Art gestellt: „Können im Rahmen werkstofftechnischer Untersuchungen Aussagen über den Rißfortschritt im Zeitraum von der letzten bzw. den letzten zerstörungsfreien Prüfungen bis zum Versagen durch den Bruch des Bauteils gemacht werden?“

Bei Kenntnis der Grundlagen der Bruchmechanik wird für deren Anwendung vorausgesetzt, daß alle relevanten Belastung sowie die maßgebenden Werkstoffeigenschaften bekannt sein müssen. Die vom Betreiber gemachten Angaben sind gegebenenfalls zu hinterfragen. Die Antwort auf die Frage nach der Lebensdauer bzw. der Rißgrößenentwicklung und der daraus folgenden Rißerkennbarkeit kann die konventionelle Werkstoffprüfung nicht geben; mit Hilfe der Bruchmechanik ist es dagegen möglich, wobei eine umfassende Kenntnis der Beanspruchungsbedingungen erforderlich ist. Die real auftretende - oftmals als unbeherrschbar angesehene - Streuung der für bruchmechanische Analyse relevanten Einflüsse, auf die schon früher NEUBER hinwies, ist kein Hindernis für derartige Analysen. Bei der Monte-Carlo-Simulation des Rißwachstums ist gerade sie die maßgebende Grundlage für die bruchmechanische Analyse, wie die Bilder 22 und 23 sowie die nachfolgend dargelegten Problemfälle zeigen. Bei der Monte-Carlo-Simulation wird die mitunter schwierige Festlegung von repräsentativen, zum Versagen der Konstruktion führenden Einflußgrößen vermieden. Daß eine Sicherheitsbewertung der Simulationsergebnisse anschließend noch erforderlich ist, sollte nicht unerwähnt bleiben.

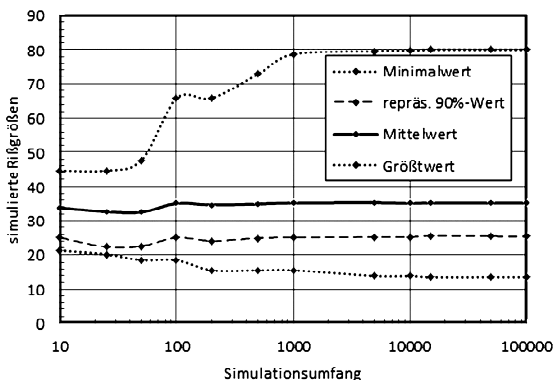


Bild 23: Die Auswirkung des Simulationsumfangs auf die Größe kritischer Fahrflächenquerrisse in Eisenbahnschienen UIC60.

repräsentativen, zum Versagen der Konstruktion führenden Einflußgrößen vermieden. Daß eine Sicherheitsbewertung der Simulationsergebnisse anschließend noch erforderlich ist, sollte nicht unerwähnt bleiben.

5. Bruchmechanikprojekte der Eisenbahntechnik

5.1. Zur Dauerfestigkeit der Laufflächen klotzgebremster Eisenbahnvollräder [39]

Auf der Lauffläche klotzgebremster Eisenbahnräder bilden sich durch die Wirkung der Bremse flache, mehr oder weniger senkrechte Querrisse, die unter ungünstigen Umständen zum Bruch des Vollrades führen können.

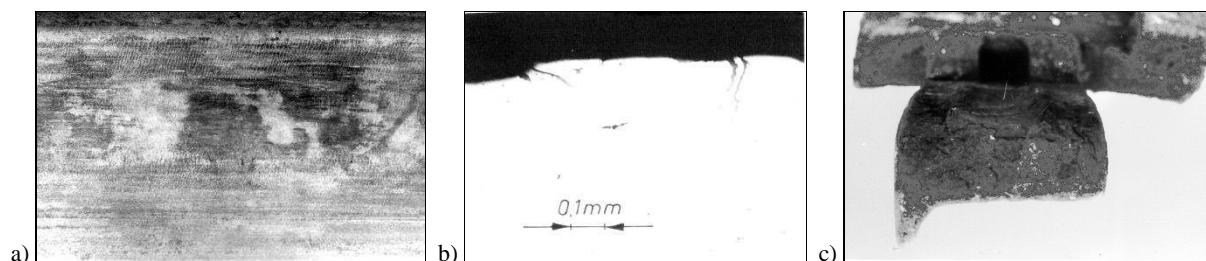


Bild 24: Klotzgebremste Eisenbahnräder: a) Lauffläche mit „Krötenhaut-Rissen“, b) Mikroschliff mit Laufflächenrissen, c) im Fasenbereich überschleifender Bremsklotz, der einen Vollradbruch verursachte. [40]

Um die Auswirkungen derartiger „Krötenhaut-Risse“ auf die Dauerfestigkeit und den Bruch von Vollrädern analysieren zu können, wurden auf 60,3% des Umfanges eines Vollrades in 50 mm Entfernung von der Fase Schriffe entnommen. Die Tiefe der Rißfront der dabei aufgefundenen Risse reichte von 0,03 mm bis 0,98 mm. Ausgehend von diesen im Makroschliff ermittelten Rißtiefen, die zum Ausgleich von Meßunsicherheiten jeweils um 0,2 mm vergrößert angenommen wurde, ist anhand der bruchmechanischen Schwellenwerte ΔK der Ermüdungsrißausbreitung unter der Annahme, daß für das Rißwachstum allein die Kompensation der vorhandenen Eigenspannungen durch die bremsbedingten Temperaturdruckspannungen maßgebend ist, die dauernd ertragbare Zugeigenspannung berechnet worden. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der simulierten Eigenspannungen ist charakterisiert durch

$$\text{Kenngrößen für } \sigma_E = \begin{cases} \text{Mittelwert} = 108,5 \text{ MPa} \\ \text{Kleinstwert} = 65,4 \text{ MPa} \\ \text{Größtwert} = 181,0 \text{ MPa} \\ 10\% \text{-Quantilwert} = 85,8 \text{ MPa}. \end{cases}$$

Aus dem Quantilwert, der eine 90%ige Dauerfestigkeit ergibt, wird mit Hilfe eines Sicherheitsbeiwertes von 1,5 die zulässige, dauernd ertragbare Zugeigenspannung im Radkranz zu

$$\sigma_{E \text{ zul}} = 55 \text{ MPa}$$

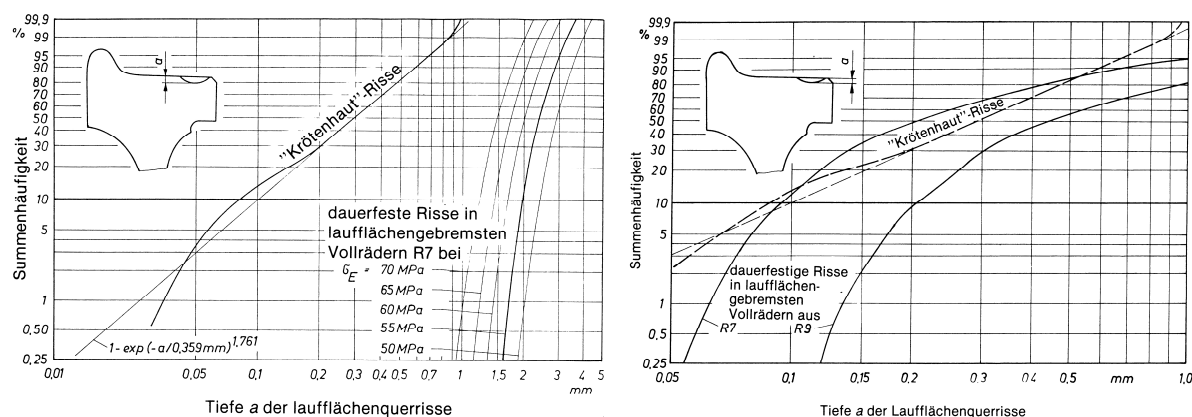


Bild 25: Vergleichende Gegenüberstellung der Summenhäufigkeitsverteilung der „Krötenhaut-Risse“ und der dauerhaftesten Querrisse auf der Lauffläche bei vorgegebenen Werten für die Eigenspannungen (links) und bei für Überbremsungen typischen Eigenspannungen (rechts). [39]

abgeleitet. Zur Kontrolle dieser Aussage aus Simulationsrechnungen für die Dauerfestigkeit der „Krötenhaut-Risse“ wurden weitere Simulationsrechnungen mit den Schwellenwerten ΔK und vorgegebenen Eigenspannungen von 50 MPa bis 70 MPa durchgeführt. Die Resultate sind im Bild 25 links der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Tiefe der Krötenhautrisse gegenübergestellt. Eine Überlappung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der vorhandenen „Krötenhaut-Risse“ und der dauerhaftesten Risse für die als zulässig bestimmte Eigenspannung von 55 MPa erscheint demnach ausgeschlossen. Mit zunehmender Größe der Eigenspannungen kann es jedoch in Einzelfällen zum Wachsen der „Krötenhaut-Risse“ und letztlich zum Bruch des Vollrades kommen.

Weitere Simulationsrechnungen wurden durchgeführt unter Berücksichtigung der für Überbremsungen typischen Eigenspannungen (Bild 25, rechts). Die Resultate zeigen eine weitgehende Übereinstimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der berechneten dauerhaftesten Risse mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der „Krötenhaut-Risse“. In der Betriebspraxis werden die vorhandenen „Krötenhaut-Risse“ bei normalen Bremsungen zwar dauerhaft sein, nach Überbremsungen sind diese Risse aber ausbreitungsfähig, so daß nach Überbremsungen ein Bruch des Vollrades nicht auszuschließen ist.

In der Konsequenz dieser Untersuchungen wurden bei der DEUTSCHEN REICHSBAHN Maßnahmen zur Erhöhung der Betriebssicherheit umgesetzt mit dem Ausmustern der überbremssten Vollräder, dem Erkennen der Überbremsung nicht nur anhand des Farbabbrandes im Radkranzbereich und Möglichkeiten zur Regenerierung.

5.2. Einschätzung des Rißwachstums in einer gebrochenen Fahrzeugachse [41]

Die Achsen von Schienenfahrzeugen sind die klassischen Objekte von Dauerfestigkeitsuntersuchungen, an denen Mitte des 19. Jahrhunderts AUGUST WÖHLER seine grundlegenden Versuche durchführte. Die Achswellen der Schienenfahrzeuge werden als dauerhafteste Konstruktionen ausgelegt. Trotzdem kommt es gelegentlich vor, daß unter Betriebsbedingungen Achsbrüche auftreten. Der im folgenden behandelte Versagensfall trat am 5. Mai 1990 bei einem Leichtbau-Triebwagen der DEUTSCHEN REICHSBAHN auf.



Bild 26: Durch Kantenpressung an der Bremsscheibenhalterung gebrochene Eisenbahnachse eines Triebwagens der Deutschen Reichsbahn. [40]

Der gebrochene Querschnitt der nicht angetriebenen Achse liegt im mittleren Achsbereich am Schrumpfsitz der Bremsscheibenhalterung. Die Achse hat an der gebrochenen Stelle einen Durchmesser von 150 mm. Unter der Wirkung der umlaufenden Biegebeanspruchung hatte sich in der Achswelle ein einseitiger Querriß mit näherungsweise gerader Rißfront herausgebildet. Dieser kreissegmentförmige Querriß hat eine kritische Rißtiefe von etwa 115 mm. Die Dauerbruchfläche nimmt rund 80 Prozent des Achswellenquerschnitts ein. Seit der letzten zerstörungsfreien Prüfung der Achse, die in dreijährigem Turnus erfolgt, hatte das Fahrzeug eine Entfernung von 114 956 km zurückgelegt.

Der Größtwert der für die Bemessung bzw. den Festigkeitsnachweis maßgebenden Biegespannungen ergibt sich für eine Achsfahrmasse von 14,5 t zu $\sigma_{b \max} = 118,4$ bis 132,9 MPa. Für die Achsfahrmasse von 10,5 t für das Leerfahrzeug liegt die größte Biegespannung zwischen 85,9 und 96,4 MPa.

Da für die gebrochene Achse Beanspruchungskollektive der Biegespannungen nicht bekannt sind, wurden Anhaltswerte für die effektive Einstufenbeanspruchung $\Delta\sigma_{eff}$ über den Crestfaktor, d.h. das Verhältnis der Maximalbeanspruchung zur Effektivbeanspruchung, aus annähernd vergleichbaren Untersuchungen an den Achsen von Güterwagen abgeleitet. Die Effektivwerte der Biegespannungen liegen für die gebrochene Tfz-Achse dementsprechend zwischen 33 und 70 MPa, im Mittel bei 50 MPa.

Die streuenden Rißwachstumseigenschaften wurden durch einen gleichbleibenden PARIS-Exponenten n und unterschiedliche PARIS-Faktoren C ausgedrückt. Verwendet wurden der Mittelwert von C und als repräsentative Extremwerte der PARIS-Faktoren die Werte, die in Anlehnung an die ECCS-Referenzfunktion [42] für die Rißwachstumseigenschaften mit einer Summenhäufigkeit P von 97,7% bzw. 2,3% bei logarithmischer Normalverteilung (bzw. 2 Standardabweichungen bei logarithmischer Auftragung über bzw. unter der Mittelwertkurve) auftreten.

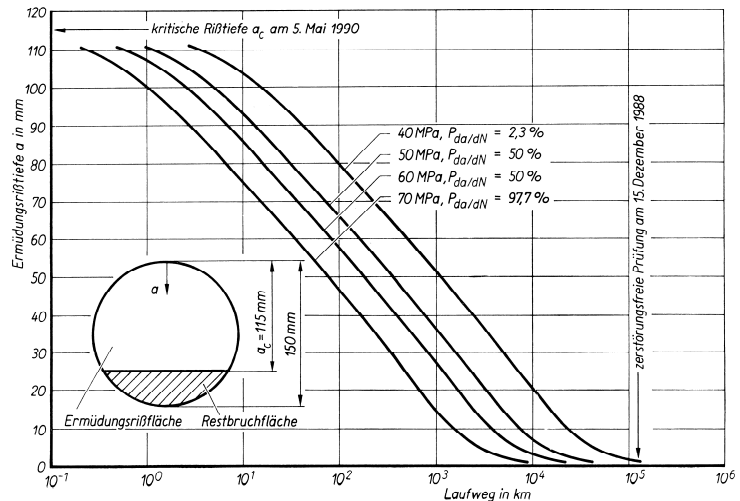


Bild 27: Berechnungsergebnisse des Rißwachstums in der gebrochenen LVT-Laufachse bis zur kritischen Rißtiefe von 115 mm.[41]

Um die Restnutzungsdauer der rißgeschädigten Achse anhand des Ermüdungsrißwachstums bis zum erfolgten Bruch realistisch einschätzen zu können, sind deterministische Rißwachstumsrechnungen mit verschiedenen Kombinationen von Effektivspannungen und PARIS-Koeffizienten vorgenommen worden. Dabei wurden jeweils die kleinsten Werte für die Spannung und für die Rißwachstumseigenschaften einerseits und die größten Werte andererseits miteinander kombiniert. Für die Berechnungen mit den Spannungen 50 und 60 MPa wurden die mittleren Rißwachstumseigenschaften als zutreffend angenommen. Dargestellt sind die Berechnungsergebnisse im Bild 27.

Die Rißwachstumskurven zeigen trotz der sehr breitgefächerten Streubereiche eindeutig, daß nicht von der Annahme ausgegangen werden kann, daß der bruchauslösende Riß schon zum Zeitpunkt der letzten zerstörungsfreien Prüfung vorhanden war. Mit großer Wahrscheinlichkeit hat sich der Ermüdungsriß erst nach der zerstörungsfreien Prüfung gebildet. Nicht generell ausgeschlossen werden kann jedoch, daß der Riß zum Zeitpunkt der Prüfung zwar schon vorhanden, aber noch so klein war, daß er nicht aufgefunden werden konnte. Um bei anderen Fahrzeugen der gleichen Bauart künftig ähnliche Versagensfälle auszuschließen, wurde nach der Durchführung der bruchmechanischen Untersuchungen empfohlen, den Prüfzyklus von bisher drei Jahren auf künftig ein Jahr zu verkürzen.

5.3. Analyse des Bruchs einer Ruderpinne [43]

Bei kalter Witterung brach am 20. März 1979 beim Manövrieren des Fährschiffs „Rostock“ der DEUTSCHEN REICHSBAHN vor dem Einlaufen in den Hafen von Saßnitz die Backbord-Ruderpinne. Die Bruchflächenbildung in dem mittleren Teil der Konstruktion ist im Bild 28 dargestellt. Die Schädigung entspricht der maximalen Zugbeanspruchung infolge der Kol-

lision des Backbordruders mit Eisschollen beim Wendemanöver und der daraus resultierenden Krafteinleitung in die Ruderpinne über den Ruderschaft.

Die Ruderpinne ist als Schweißkonstruktion gefertigt. Der gebrochene, den Ruderschaft umfassende Teil ① soll laut Zeichnungsangabe aus dem Baustahl St 52-3 bestehen, ist entsprechend seinen Festigkeitseigenschaften und seinem Gefüge aber vergleichbar mit einem nicht wärmebehandelten Stahlguß GS50U. Die Berechnung der Tiefe kritischer Risse an der flachen, 20° geneigten Kehlnaht zwischen den Teilen ① und ② wurde anfangs als deterministische Berechnung durchgeführt mit vorgegebenen Werten für die an der Ruderhinterkante einwirkende Kraft, anschließend wurde dann die Berechnung gestaltet als Simulationsprozeß mit Zufallswerten vorgegebener Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Kollisionskraft, die Schweißspannungen und die statische sowie die dynamische Bruchzähigkeit.

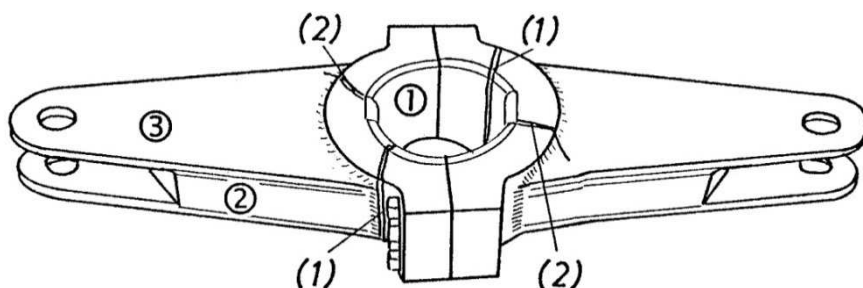


Bild 28: Riß- und Bruchbildung in der Ruderpinne. [43]

Nach ersten deterministischen Berechnungen liegen die bruchauslösenden kritischen Rißtiefen an der Kehlnaht zwischen 4,1 mm für eine Kollisionskraft von 50 kN und 2,9 mm für eine Kraft von 200 kN. Das Vorhandensein derartig tiefer, herstellungsbedingter Kerben oder stabil gewachsener Kerbrisse in einem Konstruktionsteil, das im betrieblichen Normalfall nur langsam veränderlichen Ruderkräften ausgesetzt ist, erscheint unwahrscheinlich. Anzunehmen ist deswegen, daß die Ruderpinne beim Eintritt des Schadensfalles nicht quasi-statisch beansprucht gewesen sein kann. Nach der Analyse mit Hilfe der dynamischen Bruchzähigkeit ergeben sich kritische Kerb- bzw. Rißtiefen von 1,14 mm für 50 kN große Kräfte und 0,77 mm für 200 kN. Die kritischen Tiefen liegen somit in der Größenordnung, wie sie bei Untersuchungen an handgeschweißten Kehl Nähten auf norwegischen Werften ermittelt wurden.

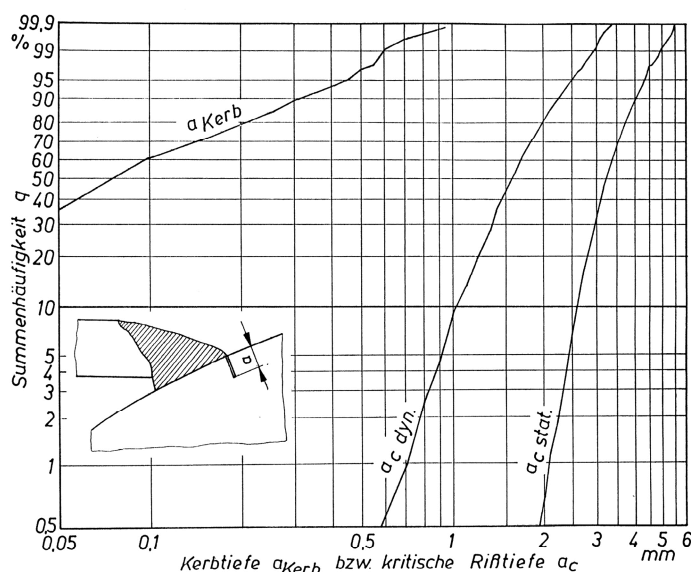


Bild 29: Vergleich der kritischen Rißtiefen an der Kehlnaht der Ruderpinne bei statischer und dynamischer Beanspruchung mit den angenommenen Kerbtiefen nach Messungen auf norwegischen Werften. [43]

anzumerken ist, daß an den Bruchflächen und an den nicht gebrochenen Kehl Nähten sich keine Einbrandkerben nachweisen ließen.

Die Gegenüberstellung der Summenhäufigkeitsverteilungen der von Bokalrud und Karlsen [46] angegebenen Tiefen von Einbrandkerben am Fuß von handgeschweißten Kehl Nähten und der berechneten kritischen Rißtiefen im Bild 29 zeigt eine teilweise Überdeckung der Verteilungen. Für die meisten Fälle trifft zweifellos die Bedingung zu, daß die vorhandene Kerbtiefe kleiner ist als die kritische Rißtiefe. Dementsprechend ist das Auftreten eines Bruchs nur in wenigen Fällen

zu erwarten. Um das vorhandene, relativ geringe Risiko eines Bruchs quantitativ einschätzen zu können, wurde einer Vielzahl zufällig ausgewählter Werte der Kerbtiefe a_{Kerb} einer ebenso großen Anzahl zufällig ausgewählter Werte der kritischen Rißtiefe a_c gegenübergestellt. Aus dem Anteil der Kombinationen, die der Bedingung entspricht, daß die Kerbtiefe größer als die kritische Rißtiefe ist, läßt sich die Größe der Bruchwahrscheinlichkeit ermitteln.

Ausgehend von 10^5 generierten Wertepaaren gleichverteilter Pseudo-Zufallszahlen ergibt sich bei Beachtung der unterschiedlichen Geschwindigkeit der Lastaufbringung die Bruchwahrscheinlichkeit zu

$$P_{\text{Bruch}} = \begin{cases} < 1 \cdot 10^{-5} & \text{(statisch)} \\ 2,7 \cdot 10^{-4} & \text{(dynamisch)}. \end{cases}$$

Bei der Anwendung dieser Berechnungsergebnisse auf die gebrochene Ruderpinne muß berücksichtigt werden, daß die theoretisch ermittelte Bruchwahrscheinlichkeit noch vermindert werden muß, da nicht alle handgeschweißten Kehlnähte Einbrandkerben aufweisen. Anhand von 20 m detailliert untersuchten Schweißnähten stellten Bokalrud und Karlsen [46] fest, daß von 827 untersuchten Stellen 325 Einbrandkerben aufwiesen. Um die reale Bruchwahrscheinlichkeit zu gewinnen, sind diesem Resultat entsprechend die simulierten Werte noch mit 0,393 zu multiplizieren, da kerbfreie Schweißungen nach den durchgeführten Betrachtungen nicht zum Bruch neigen werden. Als Ursache des Bruchs wurde durch die Simulationsrechnungen die dynamische Krafteinwirkung bei der Kollision des Ruders mit Eisschollen sehr eindeutig bestätigt.

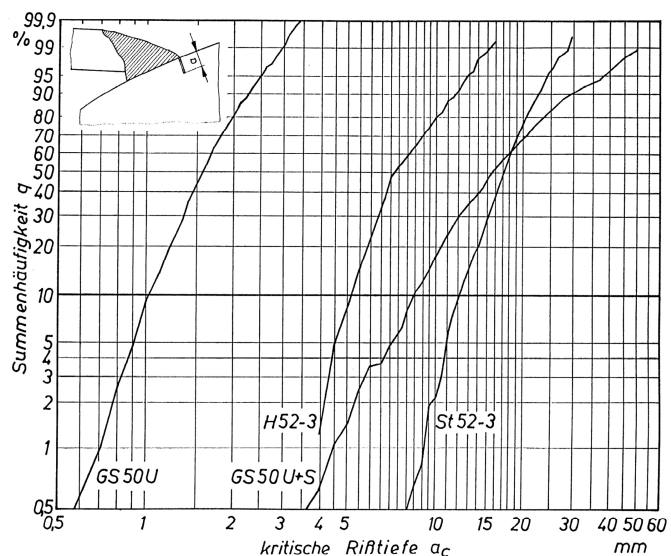


Bild 30: Gegenüberstellung der kritischen Rißtiefen für unterschiedliche Werkstoffe und Behandlungszustände bei dynamischer Beanspruchung der Ruderpinne. [43]

Der Vergleich der vorhandenen und der erforderlichen Sicherheitsbeiwerte zeigt klar, daß die Bruchsicherheit der betrachteten Ruderpinne zwar bei statisch einwirkender Kollisionskraft, nicht aber bei dynamischer Krafteinwirkung gewährleistet ist.

Die im Bild 30 wiedergegebenen probabilistischen Berechnungsergebnisse zeigen, daß sich der Bruch der Ruderpinne durch die Kollision des Ruders mit einer Eisscholle hätte vermeiden lassen, wenn ein Werkstoff mit den vorausgesetzten Eigenschaften verwendet worden wäre oder die geschweißte Konstruktion normalisiert und/oder spannungsarm gegläht worden wäre.

5.4. Lebensdauer und Rißarretierung bei einer rißgeschädigten Eisenbahnschiene [45]

Hat die bruchmechanische Analyse des Versagens einer Fahrzeugachse (Abschnitt 5.2.) gezeigt, daß auf diese Weise praktisch nutzbare Aussagen über das Versagen rißgeschädigter Bauteile sowie möglicher Verantwortlichkeiten gewonnen werden können, was mit konventionellen Laboruntersuchungen ausgeschlossen ist, so soll an dieser Stelle noch ein weiteres Problem der Lebens- bzw. Restnutzungsdauer kombiniert mit der Problematik der Rißarretierung oder anders betrachtet der zwischenzeitlichen Instabilität der Rißausbreitung mittels Monte-Carlo-Simulation betrachtet werden.

Eine fraktographisch interessante und für die bruchmechanische Analyse geeignete Bruchfläche einer Eisenbahnschiene ist im Bild 31 wiedergegeben. Die kritische Betrachtung zeigt als Bruchursache nicht nur Rollkontaktermüdung (mit einer auf der Bruchfläche nicht ganz klaren Abknicktiefe), sondern auch vor dem endgültigen Bruch eine zwischenzeitliche Instabilität. Gebrochene Eisenbahnschienen zeigen unter Praxisbedingungen im Kopf und im Fuß sowie im Steg nicht nur im Endstadium, sondern auch schon zuvor zwischenzeitlichen Spröbruch, bei dem nach der Arretierung des instabil sich ausbreitenden Risses dieser stabil weiterwächst, bis dann der endgültige Bruch eintritt. Welchen Einfluß eine zwischenzeitliche Instabilität und die Riðarretierung auf die Lebensdauer haben, ist für Schienen von Interesse, so daß dieses reale Phänomen an dieser Stelle auf der Grundlage der Monte-Carlo-Simulation neben der interessierenden Lebensdauer ebenfalls betrachtet werden kann.

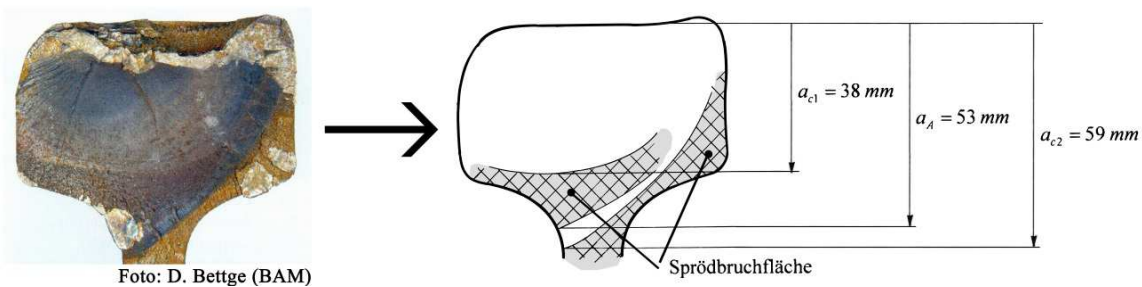


Bild 31: Durch Head Checks gebrochene Eisenbahnschiene [46] als repräsentatives Modell für die Monte-Carlo-Analyse der Lebensdauer einer durch Rollkontaktermüdung riðgeschädigten Eisenbahnschiene mit kritischen Riðtiefen von 38 mm und 59 mm sowie der Arrestriðtiefe von 53 mm.

Bezüglich des in die Simulation einzubeziehenden „Bruchzeitpunktes“ kann auf vorliegende Erfahrungen zurückgegriffen werden. Die tiefsten Schientemperaturen treten im Februar auf, so daß sich die Mitte dieses Monats als Startpunkt der Simulation anbietet. Ob bei der Größe des als kritisch angenommenen Risses der reale Bruch dann schon früher, d.h. in der ersten Frostperiode des Winterquartals auftreten würde, kann dann zwar nicht definitiv ausgeschlossen werden, mit dem gewählten Zeitpunkt werden jedoch in größerem Maße auch die Bedingungen des Winterquartals berücksichtigt, die nach vorliegenden Erfahrungen und Berechnungen das Riðwachstum beschleunigen.

Werden gegenwärtig bei der Auslegung neuer Schienenkonstruktionen statische Achslasten von 22,5 t berücksichtigt, so ist für eine realistische Dauerfestigkeitsanalyse eine Reduzierung vorzunehmen. Unterschiede treten auf bei Triebfahrzeugen, Reisezugwagen und Güterwagen. Letztere werden nicht in Betracht gezogen, da deren Auslastung doch sehr unterschiedlich ist, was zu unklaren Schlußfolgerungen führen kann. Als plausibel ist es anzusehen, aus einer von **FRYBA** ermittelten Klassenhäufigkeitsverteilung für Reisezugwagen [47, Seite 53] die vier Klassen mit den größten Klassenhäufigkeitswerten zu nutzen, um die repräsentative Achsfahrmasse für Reisezugwagen zu ermitteln. Somit ergibt sich eine mittlere Achsfahrmasse von 10,3 t. Da das Riðwachstum in der Praxis nicht einstufig ist, muß bei der Zusammenfassung der Klassenwerte für die effektiv wirksame Achsfahrmasse der Paris-Exponent berücksichtigt werden, so daß nicht die vorstehend genannte Größe von 10,3 t, sondern der größere Effektivwert von 11,3 t der Riðwachstumsanalyse zugrunde zu legen ist.

In den Tiefen von 38 mm ...53 mm wurde eine zwischenzeitliche Instabilität der Riðausbreitung berücksichtigt, um die praktischen Wirkungen dieses real auftretenden Phänomens werten zu können. Rechentechnisch erfolgte dieses, indem die Zuwächse der zu integrierenden Funktion der Restlebensdauer bzw. der noch ertragbaren Verkehrsmasse an den Stützstellen der numerischen Integration im Spröbruchbereich mit dem Wert Null berücksichtigt wurden. Durch den Instabilitätssprung des Riðfortschritts um 15 mm wurde die Lebensdauer der

Schiene anhand der bewerteten Rißwachstumskurve um rund einen halben Tag betrieblicher Nutzung verkürzt. Wenn auch dieses Phänomen als zwischenzeitliche Instabilität mit an-

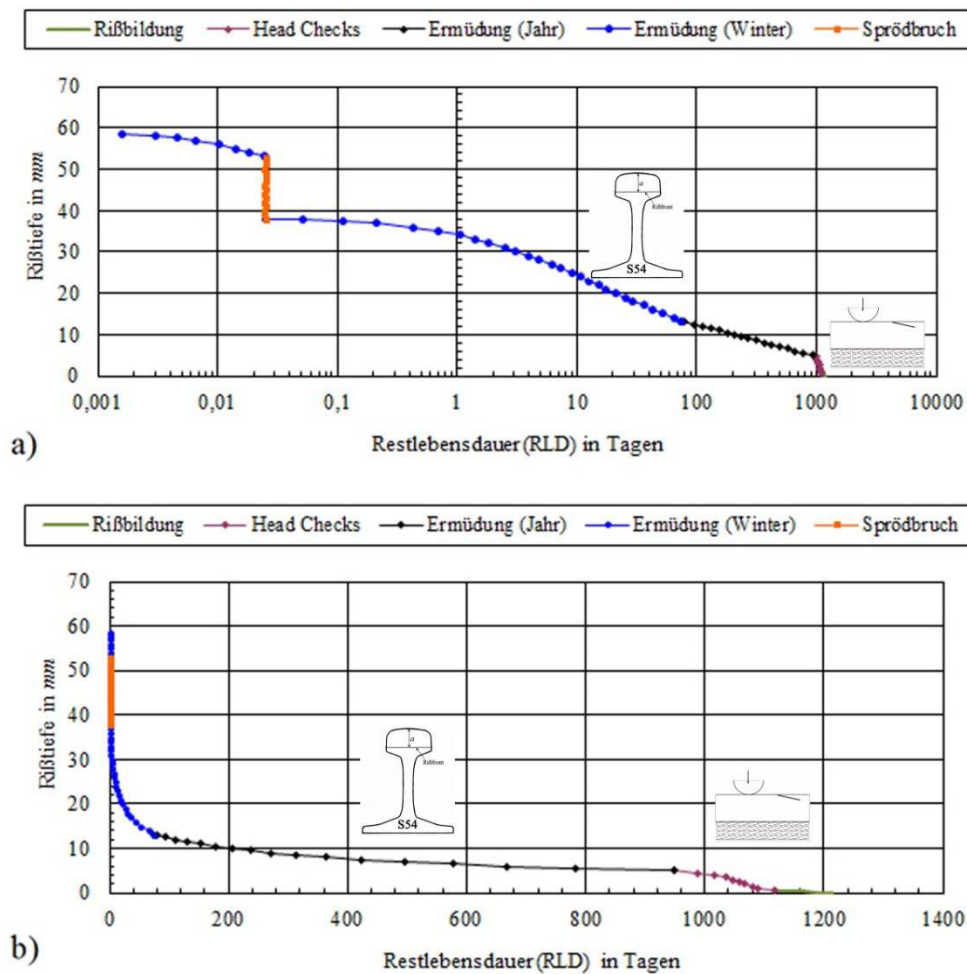


Bild 32: Ergebnisse der Rißwachstums- und Lebensdaueranalyse einer durch Head Checks gebrochenen Schiene S54 bei logarithmischer Darstellung (a) bzw. mit linearer Zeitachse (b) bei Berücksichtigung einer zwischenzeitlichen Instabilität mit Rißarretierung.[45]

schließender Rißarretierung charakterisiert werden kann, ergibt sich unmittelbar nach der „Rißarretierung“ ein Weiterwachsen des Risses infolge der einwirkenden Radkräfte, jedoch kein dauerhafter Stillstand des Risses. Nach der zwischenzeitlichen Instabilität ist die Lebensdauer der Schiene praktisch erschöpft: etwa drei Fernzüge mit je 52 Achsen genügen, um den endgültigen Bruch auszulösen.

Das Resultat der Monte-Carlo-Simulation der Lebensdauer einer durch Head Checks geschädigten und leicht verschlissenen Schiene S54 ist bei 10,3 t mittlerer Achsfahrmasse, einer Tagesbelastung von 52 kt/Tag gegeben durch rund 1 200 Tage oder drei Jahre und vier Monate bzw. rund 63 Mt Gesamtbelastung. Das Simulationsresultat entspricht mit Werten zwischen drei und vier Jahren vorliegenden Betriebserfahrungen; größenordnungsmäßig vergleichbare Werte bezüglich der belastungsabhängigen Entwicklung der Squats gibt GRASSIE [48] an. Daß die Zahlen von GRASSIE höher liegen mit 40 MGT bis zum „Aufgehen“ der Fehlerentwicklung, der sich bei 100 MGT zum „gefährlichen“ Fehler entwickelt hat, ist verschiedenen Umständen geschuldet:

- die von GRASSIE wiedergegebenen Praxiserfahrungen sind breiter gefächert und entsprechen nicht nur der hier zu ermittelnden Mindestlebensdauer,
- Squat-Risse verlaufen flacher als Head Checks und sind dementsprechend an der Rißfront auch geringer beansprucht [49],

- die Aufhängung mitten auf der Fahrfläche (im Bereich der Squats) ist geringer und bewirkt dadurch auch eine längere Lebensdauer als hier für Head Checks berechnet wurde.

Ob in konkreten Schadensfällen die bruchmechanischen Analysenresultate besser sein werden, ist fraglich, da die erforderlichen Berechnungsannahmen dann teilweise auch nur anhand zurückliegender Erfahrungen und Festlegungen gewonnen werden können.

6. Resümee

Der vorstehend dargelegte Parforce-Ritt durch die Geschichte des Eisenbahnwesens mit spezieller Betrachtung von ausgewählten Schadensfällen und aus ihnen abgeleiteter Schlußfolgerungen zeigt, daß aus Schadensfällen sehr wohl Erkenntnisse abgeleitet werden können, um künftig Schäden zu verhüten. Sowohl der Wissenschaft und ihren Repräsentanten als auch den Verantwortungsträgern im Eisenbahnwesen fällt hierbei naturgemäß eine bedeutsame Rolle zu. Daß Entscheidungen und Vorgaben „aus höherer Warte“ mitunter zu Fehlleistungen führen können, dokumentierte der Wunsch nach der Realisierung der „bewährten Fischbauchform“ für die von Birkinshaw gewalzten Schienen. Daß Vorgaben von höherer Stelle aber auch positive und lange anhaltende Wirkungen haben können, hatte sich 1975 in Kirchmöser gezeigt durch die damals angeregte Befassung des neuen Mitarbeiters mit Rissen und Brüchen im Bereich des Eisenbahnwesens auf der Grundlage der Bruchmechanik.

Daß mit der wissenschaftlichen Analyse von Schadensfällen und den daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen nicht immer so umgegangen wird, wie es im Interesse der Gesellschaft mit der ethischen Verantwortung der Wissenschaft für Menschenleben und die Verhinderung materieller Schäden angemessen sein sollte, zeigt u.a. die Rezension von Pusch zu dem Buch „Einführung in die bruchmechanische Schadensbeurteilung“ [50]: „Neben einer Vielzahl von Beispielen für die erfolgreiche bruchmechanische Bauteilbewertung unter Einbeziehung von Rissen bzw. rißähnlicher Spannungskonzentrationsstellen sowie der Werkstoffentwicklung und dem beanspruchungsgerechten Werkstoffeinsatz ist hierbei auch die Analyse von Schadensfällen und die Ableitung von Maßnahmen für die Schadensverhütung von ökonomischer und ökologischer Bedeutung. Der letztgenannte Anwendungsbereich, im Schrifttum häufig aus vereinbarter Vertraulichkeit unterrepräsentiert, ist Gegenstand des vorliegenden Titels, wobei der Autor an einer Vielzahl von anschaulich erläuterten Beispielen bruchmechanischer Schadensfallanalysen auf eigene Arbeiten als Forscher und Hochschullehrer verweisen kann.“

Konstatiert werden muß, daß der Umgang mit Schadensfällen und ihrer wissenschaftlichen Aufarbeitung im Ausland - erinnert sei an dieser Stelle an die spektakulären Eisenbahnunfälle von Woodlawn bei Marshall (Texas, USA) am 12. November 1983 und bei Hatfield nahe London (Großbritannien) am 17. November 2000 - wesentlich offener, unvoreingenommener und letztlich effektiver ist als in Deutschland. Gutachten werden hierzulande zur Monopolisierung der Wissenschaft genutzt, was - unabhängig, ob institutionell oder individuell veranlaßt, - mit Fug und Recht als eine spezielle Art wissenschaftlichen Fehlverhaltens zu disqualifizieren ist.

Nicht auszuschließen ist, daß sich die Wissenschaft durch ihre Repräsentanten auf Irrwege begibt, wie es aus der Vergangenheit bekannt ist, als Otto von Guericke und Gottfried Wilhelm Leibniz aufgefundene Knochen als zu einem Einhorn gehörig interpretierten [51]. Ein ähnlicher Irrtum ist es wohl, wenn bei der Rollkontaktermüdung von Eisenbahnschienen dem in die Risse eingedrungenen Wasser eine hydraulische Sprengwirkung zugeschrieben wird, die für die weitgehend gradlinige Rißausbreitung verantwortlich sein soll bei vollständiger Vernachlässigung der durch die Rollkontaktbeanspruchung geänderten Eigenschaften des Schienenstahls.

Können die Darlegungen als Anregung zum Befassen mit der technischen Vergangenheit aufgefaßt werden, so sollte aus der Sicht des dargelegten wissenschaftlichen Betätigungsfeldes, der Bruchmechanik, gezeigt werden, daß mit Hilfe bruchmechanischer Analysen die Ursachen aufgetretener Schäden geklärt werden können, sei es für die Lebensdauer rißgeschädigter Bauteile, für die Gefährlichkeit von Rissen oder welche Maßnahmen dazu geführt hätten, den Bruch zu vermeiden. Kann auf diese Weise die Verantwortlichkeit für aufgetretene Schäden geklärt werden, so ist es doch wichtiger, künftig ähnliche Schäden zu vermeiden!

Was aus den vorstehenden Darlegungen aber auch abgeleitet werden kann, ist die Erkenntnis, daß die Entwicklung der technischen Wissenschaften nicht ausschließlich im Selbstlauf erfolgt, sondern mitunter in starkem Maße auch durch Schadensfälle und durch Persönlichkeiten, die sich der Lösung der Problematik annehmen, vorangetrieben wird.

7. Literaturverzeichnis

- [1] P. Herring: Ultimate Train (deutschsprachige Ausgabe: Die Geschichte der Eisenbahn). Dorling Kindersley Limited, London, 2000.
- [2] C. Asmus: Die deutsche Eisenbahn. Parragon, Bath, New York, ..., ohne Jahr.
- [3] A. Haarmann: Das Eisenbahn-Geleise, geschichtlicher Teil, erste Hälfte. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1891.
- [4] Wikipedia, the free encyclopedia: John Birkinshaw. https://en.wikipedia.org/wiki/John_Birkinshaw
- [5] K.-O. Edel, G. Budnitzki, T. Schnitzer: Schienenfehler - Beanspruchung und Bruch von Eisenbahnschienen. Springer - Vieweg, Berlin, voraussichtlich 2018.
- [6] A. Fürst: Die Welt auf Schienen. Weltbild Verlag, Augsburg, 2003. Nachdruck der Ausgabe von 1918 des Albert Langen Verlags, München, Seite 193, Bild 142.
- [7] A. Bloss: Oberbau und Gleisverbindungen. Verlag von Julius Springer, Berlin, 1927, Seite 133, Bild 200.
- [8] http://www.prodatron.net/webold/transrapid_2/GALLERY/07WEICHE.JPG
- [9] [http://gerald-massey.org.uk/Railway/c10_construction_\(IV\).htm](http://gerald-massey.org.uk/Railway/c10_construction_(IV).htm)
- [10] E. Winkler: Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik für polytechnische Schulen, Akademien, Ingenieure, Maschinenbauer, Architekten, etc. Verlag von H. Dominicus, Prag, 1868. http://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10135085_00196.html
- [11] <http://momentum-magazin.de/de/zum-125-todestag-von-emil-winkler/>
- [12] http://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10135085_00005.html?contextType=scan
- [13] <http://www.fotolibra.com/gallery/1451827/august-ernst-hermann-zimmermann-in-1845-1935-german-struct/>
- [14] H. Zimmermann: Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues. Verlag von Ernst & Korn, Berlin, 1888; 2. Auflage Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2. Auflage, 1930.
- [15] V. Freiherr von Röhl: Enzyklopädie des Eisenbahnwesens, Band 7. Berlin, Wien 1915, S. 381-414. <http://www.zeno.org/Roell-1912/A/Oberbau>
- [16] Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Zentralamt München: Oberbauberechnung. Ausgabe: 1992.

- [17] W. Ruske u.a.: BAM - Die Chronik 1871-1996. 125 Jahre Forschung und Entwicklung, Prüfung, Analyse, Zulassung, Beratung und Information in Chemie- und Materialtechnik. Wirtschaftsverlag NW - Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 1996.
- [18] W. Seidel: Werkstofftechnik. Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung. Carl Hanser Verlag, Wien/München, 2. Auflage 1993.
- [19] C. Stamm: Brückeneinstürze und ihre Lehren. Mitteilungen aus dem Institut für Baustatik der ETH Zürich, Nr. 24. Verlag Leemann, Zürich, 1952.
- [20] <http://photobibliothek.ch/seite007ab.html>
- [21] [https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Ritter_\(Bauingenieur\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Ritter_(Bauingenieur))
- [22] <http://www.ethistory.ethz.ch/rueckblicke/departemente/dbaug/weitere%5Fseiten/tetmajer/popupfriendly/>
- [23] <http://www.freunde-der-va.de/geschichte.html>
- [24] <https://www.wkm.mw.tum.de/geschichte/foepppl-august/>
- [25] https://de.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Gottfried_Gerber#/media/File:Dr._Heinrich_Gerber.jpg
- [26] ...: Das neue Schweizer Normenwerk zum Umgang mit bestehenden Tragwerken. https://www.researchgate.net/publication/264648783_Das_neue_Schweizer_Normenwerk_zum_Umgang_mit_bestehenden_Tr Tragwerken
- [27] B. Neunteufl: Wieghardt & Irwin Centenary Conference (WICC). Technische Universität Wien, 21. Februar 2007. http://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news_detail/article/3827/
- [28] K. Wieghardt: Über das Spalten und Zerreißen elastischer Körper. Zeitschrift für Mathematik und Physik **55** (1907) 1/2, Seite 60 – 103.
- [29] H.-P. Rossmann: Fracture mechanics and materials testing: forgotten pioneers of the early 20th century. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures **22** (1999), Seite 781 - 797.
- [30] H.-P. Rossmann: An introduction to K. Wieghardt's historical paper "On splitting and cracking of elastic bodies". Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures **12** (1995), Seite 1367 – 1369 und 1371 - 1405
- [31] A. A. Griffith: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. A **221** (1920), Seite 163 – 198.
- [32] A. A. Griffith: Theory of Rupture. Proceedings of the 1st International Congress of Applied Mechanics, Delft, 1924, Seite 55 – 63.
- [33] G. R. Irwin: Fracture. In: S. Flügge (Hrsg.): Handbuch der Physik, Band VI, Seite 551-590. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1958.
- [34] H. Blumenauer: Meilensteine der Bruchmechanik. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 15. Sommerkurs Werkstoffe und Fügen am Institut für Werkstoff- und Füge-technik, 12. und 13. September 2014, Seite 93 - 100.
- [35] H. Neuber: Kerbspannungslehre. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1985, Seite 5
- [36] H. G. Hahn: Spannungsverteilung an Rissen in festen Körpern – Vergleichende Betrachtung der in der Bruchmechanik verwendeten Reißmodelle. VDI-Verlag, Düsseldorf, VDI-Forschungsheft 542, 1970.
- [37] H. G. Hahn: Bruchmechanik – Einführung in die theoretischen Grundlagen. B. G. Teubner, Stuttgart, 1976.

- [38] W. Gilde: Nachahmung empfohlen - Gedanken und Erinnerungen. Mitteldeutscher Verlag, Halle/Leipzig, 1988, Seite 65 - 66.
- [39] K.-O. Edel, M. Schaper: Bruchmechanische Dauerfestigkeitsanalyse der rißgeschädigten Lauffläche überbremster Eisenbahnvollräder. Schienen der Welt **23** (1992) 11, Seite 35 - 49.
- [40] K.-O. Edel: Einführung in die bruchmechanische Schadensbeurteilung. Springer Vieweg, Berlin / Heidelberg, 2015.
- [41] K.-O. Edel, M. Korn: Einschätzung des Rißwachstums in einer gebrochenen Fahrzeugachse. IfL-Mitteilungen **30** (1991) 1, Seite 5-12.
- [42] Europäische Konvention für Stahlbau - Technische Kommission 6 „Ermüdung“: Empfehlungen für die Bemessung und Konstruktion von ermüdungsbeanspruchten Stahlbauten. ECCS. Herausgeber: Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau. SZS-Publikation E3, EKS-Publikation N° 43, erste Ausgabe, 1987.
- [43] K.-O. Edel, R. Ortman: Bruchmechanische Analyse des Versagens einer Ruderpinne. Schiffbauforschung **27** (1988) 2, Seite 138 - 145.
- [44] T. Bokalrud, A. Karlsen: Control of Fatigue Failures in Ship Hulls by Ultrasonic Inspection. Norwegian Maritime Research 10 (1982) 1, Seite 9-15.
- [45] K.-O. Edel: Aus der Rollkontaktermüdung resultierende Lebensdauer von Eisenbahnschienen. Technische Universität Berlin, Eisenbahnwesen-Seminar, 12. Juni 2017, Vortragsmanuskript. <https://opus4.kobv.de/opus4-fhbrb/frontdoor/index/index/docId/1872>, ebenso: http://www.ews.tu-berlin.de/fileadmin/fg98/aushaenge/2017-sose/2017-06-12_EWS_Edel_Rollkontakterm%C3%BCdung.pdf
- [46] ...: Qualifizierung von Prüfpersonal für die zerstörungsfreie Material- und Bauteilprüfung. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung. Berlin, Programm Januar bis Juni 2017, Modul 4 Fraktographie (D. Bettge, P. D. Portella: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin), Seite 16. Ebenso: <http://www.fraktographie.bam.de/de/home/index.htm>
- [47] K.-O. Edel: Untersuchung des Bruchverhaltens von Eisenbahnschienen und -vollrädern. Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Dissertation B, Januar 1987.
- [48] S. L. Grassie, D. I. Fletcher, G. Hernandez, E. Alberto, P. Summers: „Studs“: a squat-type defect in rails. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit **226** (2011) 3, Seite 243 - 256.
- [49] T. Schnitzer: Bruchmechanische Analyse des Wachstums von Rollkontaktermüdrissen in Eisenbahnschienen. Shaker Verlag, Aachen, TU Berlin, Dissertation, 2005.
- [50] G. Pusch: Rezension (zu [40]). Freiberg, 11. Juni 2015. <https://opus4.kobv.de/opus4-fhbrb/frontdoor/index/index/docId/1525>
- [51] [https://de.wikipedia.org/wiki/Einhornh%C3%B6hle_\(Harz\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Einhornh%C3%B6hle_(Harz))