

AMTS-UND MITTEILUNGSBLATT DER BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG

Professor Dr.-Ing. Max Pfender zum 70. Geburtstag	137
Schwingfestigkeits-Bemessungsgrundlage für den gestaltenden Ingenieur <i>D. Findeisen</i>	138
Zur Messung des Erstarrens von Zementpasten <i>M. Maultzech</i>	146
Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung <i>E. Limberger, K. Brandes u. J. Herter</i>	149
Eine Sonde zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität von Baustoffen in situ <i>A. Wagner</i>	153
Ein Beitrag zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken <i>B. Böttcher u. R. Rudolphi</i>	158
Heizstab-Verkrustungen in Haushaltwaschmaschinen und Phosphataufbau von Vollwaschmitteln <i>U. Sommer u. H. Milster</i>	164
Materialprüfung und Sicherheitstechnik <i>K.-H. Möller †</i>	167
Die Entwicklung der Verschleißforschung im Rahmen der Tribologie <i>H. Czichos u. K.-H. Habig</i>	171
Einsatz der elektrochemisch-potentiostatischen Konzentrationsmessung in Kernkraftwerken <i>G. Teske</i>	179
Referate wissenschaftlicher Veröffentlichungen aus der BAM, die in anderen Zeitschriften erschienen sind	185
Amtliche Bekanntmachungen	
Richtlinien über Anforderungen an Sauerstoff(O ₂)-Handmeßgeräte und an tragbare Sauerstoff(O ₂)-Meßeinrichtungen für Volumengehalte an O ₂ von weniger als 21 % sowie Durchführung der Eignungsuntersuchung – Ausgabe Juni 1977	186
Bekanntmachung von Zulassungen für die Verpackung gefährlicher Seefrachtgüter	197

Organisationsplan der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)

Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45

Präsident Vizepräsident	Dienststelle 0.1 Information und Öffentlichkeitsarbeit	Dienststelle 0.2 Angewandte Mathematik und Mechanik	Dienststelle 0.3 Technischer Dienst	Dienststelle 0.4 Verwaltung und Rechtsangelegenheiten	
Abteilung 1 Metalle und Metallkonstruktionen	Abteilung 2 Bauwesen	Abteilung 3 Organische Stoffe	Abteilung 4 Chemische Sicherheitstechnik	Abteilung 5 Sondergebiete der Materialprüfung	Abteilung 6 Stoffartunabhängige Verfahren
1.01 Sonderfragen der Abteilung	Arbeitsgruppen Konstruktionstechnische Reaktorsicherheit Sekretariat für UEAtc-Fragen 2.01 Allgemeine bautechnische Probleme	3.01 Klimbeanspruchungen	4.01 Transport gefährlicher Güter Lagerung gefährlicher Güter	5.01 Sonderfragen der Abteilung	6.01 Sonderfragen der Abteilung
Fachgruppe 1.1 Metallkunde und Metalltechnologie	Fachgruppe 2.1 Mineralische Baustoffe	Fachgruppe 3.1 Kautschuk, Kunst- und Anstrichstoffe	Fachgruppe 4.1 Heterogene Verbrennungs- reaktionen; Sondergebiete	Fachgruppe 5.1 Biologische Materialprüfung	Fachgruppe 6.1 Meßwesen und Grundlagen der Versuchstechnik
1.11 Metallographie und Metalltechnologie	2.11 Chemische und physikalische Untersuchungen	3.11 Kautschuk und Kautschukerzeugnisse	4.11 Verbrennungs- und Selbst- entzündungsvorgänge; Reaktionen mit Sauerstoff	5.11 Mikrobiologie und Zoologie	6.11 Mechanische und flu- idische Verfahren
1.12 Physikalische Meßverfah- ren in der Metallkunde	2.12 Festigkeitsuntersuchungen	3.12 Kunststoffkunde	4.12 Staubbrände und Staubexplosionen	5.12 Materialschutz gegen Organismen	6.12 Elektrische Verfahren
1.13 Elektronenmikroskopie und Feinstrukturunter- suchungen	2.13 Technologie der Baustoffe	3.13 Kunststoffherzeugnisse	4.13 Thermochemie; Kalorimetrie	5.13 Holzschutz- und Holzchemie	6.13 Experimentelle Span- nungsanalyse; optische Verfahren
1.14 Metallurgie; Metallkeramik	2.14 Sonderprobleme und Güteschutz	3.14 Anstrich-, Belag- und Klebstoffe	4.14 Explosionsdynamik	5.14 Holz- und Holzwerkstoff- Technologie	6.14 Materialprüfmaschinen und elektrische Meßgeräte
Fachgruppe 1.2 Werkstoffmechanik und Ver- halten von Konstruktionen	Fachgruppe 2.2 Trefähigkeit der Baukonstruktionen	Fachgruppe 3.2 Textilien und Leder	Fachgruppe 4.2 Technische Gase	Fachgruppe 5.2 Rheologie und Tribologie	Fachgruppe 6.2 Zerstörungsfreie Prüfung
1.21 Festigkeit bei statischer Be- anspruchung; Umformung	2.21 Baukonstruktionen des Massivbaues	3.21 Physik und Technologie von Textilien	4.21 Chemische Eigenschaften; Gasanalyse	5.21 Rheometrie	6.21 Mechanische und thermische Prüfverfahren
1.22 Festigkeit bei periodischer Beanspruchung	2.22 Baukonstruktionen aus Metall	3.22 Textilchemie	4.22 Sicherheitstechnische Kennzahlen; Zündvorgänge	5.22 Rheologisches Verhalten von Werkstoffen	6.22 Elektrische und magne- tische Prüfverfahren
1.23 Antriebs Elemente und Getriebe	2.23 Baukonstruktionen aus Holz, Kunststoffen und Sonderbaustoffen	3.23 Waschmittel, Wäscherei- technik, Chemischreinigung	4.23 Gasschutz; Überwachung von Arbeitsvorgängen	5.23 Schmierstoffe; Tribochemie	6.23 Strahlenverfahren und Strahlenschutz
1.24 Behälteruntersuchungen	2.24 Grundlagen und Sonderprobleme	3.24 Leder, Kunstleder, Rauchwaren	4.24 Sicherheitstechnische Beur- teilung von Anlagen und Verfahren	5.24 Tribometrie und Tribophysik	6.24 Verfahren zur zerstörungs- freien Untersuchung von Werkstoffeigenschaften
Fachgruppe 1.3 Korrosion und Metallschutz	Fachgruppe 2.3 Tiefbau	Fachgruppe 3.3 Papier, Druck, Verpackung	Fachgruppe 4.3 Explosionsfähige feste und flüssige Stoffe	Fachgruppe 5.3 Oberflächenphänomene	Fachgruppe 6.3 Kerntechnik in der Materialprü- fung und Strahlenschutz
1.31 Thermodynamik und Kinetik der Korrosion	2.31 Grundbau und Bodenme- chanik	3.31 Zellstoff- und Papierchemie	4.31 Systematik und Prüfmethodik	5.31 Oberflächen-Morphologie	6.31 Physikalische und meß- technische Grundlagen
1.32 Technologie und Morpho- logie der Überzugssysteme	2.32 Baugrunderdynamik	3.32 Physik und Technologie von Papier und Pappe	4.32 Explosive Stoffe	5.32 Zusammensetzung von Oberflächenschichten	6.32 Strahlenschutz
1.33 Korrosion technischer Anlagen und Geräte	2.33 Bituminöse Straßen und Bauwerksabdichtungen	3.33 Druck- und Kopiertechnik, Schreibmittel	4.33 Stoffe mit geringer chemi- scher Beständigkeit	5.33 Grenzflächen-Kinetik	6.33 Anwendung von Radionukliden
1.34 Klimatische Beanspruchung metallischer Werkstoffe und Schutzsysteme	2.34 Grundlagen und Sonder- probleme des Tiefbaus	3.34 Verpackung	4.34 Pyrotechnische Sätze und Gegenstände	5.34 Elektrochemische Meß- verfahren und Schadstoff- Analytik	6.34 Prüfung radioaktiver Stoffe
Fachgruppe 1.4 Anorganisch-chemische Untersuchungen	Fachgruppe 2.4 Bautenschutz	Fachgruppe 3.4 Sonderprüfungen für organische Stoffe	Fachgruppe 4.4 Gasgeräte und Acetylenanlagen	Fachgruppe 5.4 Farbmetrik	Fachgruppe 6.4 Fügetechnik
1.41 Analyse von Eisen und Stahl	2.41 Brandschutz, Feuerschutz	3.41 Analyse organischer Stoffe	4.41 Explosive Reaktionen der Acetylene	5.41 Farbmessung	6.41 Schmelzschweißen
1.42 Analyse von Nichteisen- metallen	2.42 Wärmeschutz, klimabe- dingter Feuchtigkeitsschutz	3.42 Feinstrukturuntersuchungen; Massenspektrometrie	4.42 Speicherung der Acetylene; Beurteilung von Verfahren	5.42 Glanzmessung	6.42 Preßschweißen und Sonderverfahren
1.43 Analyse nichtmetallischer anorganischer Stoffe	2.43 Schallschutz, Erschütterungsschutz	3.43 Physikalische und tech- nische Untersuchungen	4.43 Sicherheitseinrichtungen für technische Gase	5.43 Farbtechnik	6.43 Löten, Kleben und Kunststoffschweißen
1.44 Spektralanalyse	2.44 Grundlagen und Sonderprobleme des Bautenschutzes	3.44 Erdöl- und Kohleerzeug- nisse	4.44 Apparaturen für technische Gase	5.44 Farbwiedergabe	6.44 Fügegerechte Gestal- tung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Professor Dr.-Ing. Max Pfender zum 70. Geburtstag	137
Schwingfestigkeits-Bemessungsgrundlage für den gestaltenden Ingenieur <i>D. Findeisen</i>	138
Zur Messung des Erstarrens von Zementpasten <i>M. Maultzech</i>	146
Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung <i>E. Limberger, K. Brandes u. J. Herter</i>	149
Eine Sonde zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität von Baustoffen in situ <i>A. Wagner</i>	153
Ein Beitrag zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken <i>B. Böttcher u. R. Rudolphi</i>	158
Heizstab-Verkrustungen in Haushaltwaschmaschinen und Phosphataufbau von Vollwaschmitteln <i>U. Sommer u. H. Milster</i>	164
Materialprüfung und Sicherheitstechnik <i>K.-H. Möller †</i>	167
Die Entwicklung der Verschleißforschung im Rahmen der Tribologie <i>H. Czichos u. K.-H. Habig</i>	171
Einsatz der elektrochemisch-potentiostatischen Konzentrationsmessung in Kernkraftwerken <i>G. Teske</i>	179
Referate wissenschaftlicher Veröffentlichungen aus der BAM, die in anderen Zeitschriften erschienen sind	185
Amtliche Bekanntmachungen	
Richtlinien über Anforderungen an Sauerstoff(O ₂)-Handmeßgeräte und an tragbare Sauerstoff(O ₂)-Meßeinrichtungen für Volumengehalte an O ₂ von weniger als 21 % sowie Durchführung der Eignungsuntersuchung – Ausgabe Juni 1977	186
Bekanntmachung von Zulassungen für die Verpackung gefährlicher Seefrachtgüter	197

Herausgabe und Druck	Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Redaktion	M. Mennigen (Geschäftsführendes Redaktionsmitglied), RegDir. Dr. G. Strese und Dir. u. Prof. Dr. H. Terstiege
Anschrift	Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Fernsprecher	(030) 8104-1
Fernschreiber	018 - 3261 bamb d
Erscheinungsweise	Viermal jährlich
Bezugspreis	24,- DM für das Jahresabonnement. Bei Bedarf erscheinende Sonderhefte werden zusätzlich berechnet. Einzelheft: 8,- DM In den Preisen sind die Versandkosten enthalten. Bestellungen sind an die Bundesanstalt für Materialprüfung zu richten.



**Professor Dr.-Ing. Max Pfender
zum 70. Geburtstag**

Der ehemalige Präsident der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Prof. Dr.-Ing. Max Pfender, vollendet am 21. August 1977 sein 70. Lebensjahr. Dieses Heft des von ihm begründeten Amts- und Mitteilungsblattes enthält Beiträge, die ihm Mitarbeiter der BAM zu diesem Tage gewidmet haben. Darüber hinaus erscheint ein Heft der Zeitschrift „Materialprüfung“ mit Veröffentlichungen, die ihm von Fachkollegen und Freunden gewidmet worden sind.

Die vorliegenden Arbeiten geben einen kleinen Einblick in die Vielfalt der von der Bundesanstalt für Materialprüfung wahrzunehmenden Aufgaben und entsprechen der von Prof. Pfender in seinem Geleitwort vom Juli 1970 gesetzten Zielrichtung dieser Zeitschrift, „ . . . über die amtlichen Mitteilungen hinaus einschlägigen Informationen für die Materialprüfung und die chemische Sicherheitstechnik und Nachrichten aus dem Bereich der Bundesanstalt selbst . . .“ Raum zu geben.

Anlaß für die Herausgabe des Amts- und Mitteilungsblattes der Bundesanstalt für Materialprüfung war das Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz) vom 25. August 1969, mit dem der BAM als Bundesoberbehörde die Zuständigkeit für die Zulassung explosionsgefährlicher Stoffe und Sprengzubehör übertragen wurde. Der damit verbundenen Auflage zur Veröffentlichung der Zulassungen genügte das bis dahin publizierte Schrifttum der Bundesanstalt nicht mehr, so daß die Herausgabe eines periodisch erscheinenden amtlichen Organs notwendig wurde. Als Prof. Pfender im Jahre 1972 in den Ruhestand trat, lag diese neue Publikation in ihrem 3. Jahrgang in der von ihm vorgesehenen Konzeption vor, die bis auf einige Erweiterungen im wesentlichen beibehalten wurde.

Die Mitarbeiter der Bundesanstalt für Materialprüfung gratulieren Max Pfender zu seinem Geburtstag sehr herzlich und wünschen ihm weiterhin Gesundheit und Schaffenskraft.

(Professor Dr. G. W. Becker)

Inhaltsangabe

Die gewonnenen Erkenntnisse über das Schwingfestigkeitsverhalten von Werkstoffen und Bauteilen sind das Ergebnis einer sehr intensiven Forschertätigkeit über mehrere Generationen. Beginnend mit den ersten systematischen Schwingfestigkeitsuntersuchungen durch A. Wöhler bis zur linearelastischen Bruchmechanik und Werkstoffphysik der Gegenwart wurde der Versuch unternommen, anhand ausgewählter Marksteine den Erkenntnisweg der noch keineswegs abgeschlossenen Schwingfestigkeitsforschung nachzuvollziehen. Die vorliegende Übersicht ist aus dem Blickwinkel des ursprünglichen Fragestellers, nämlich des Konstrukteurs dargestellt, dessen Aufgabe es ist, schwingbeanspruchungsgerecht zu gestalten.

Schwingfestigkeit – Erkenntnisse – Gestaltung

Herrn Professor Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines
70. Lebensjahres gewidmet

dauernd zulässigen Schwingungen bestimmen, sind um so kleiner, je größer die dabei erreichte Maximalspannung ist"

1. Einleitung

Die Schwingfestigkeit als diejenige Grenzspannung, die zum Eintritt eines Schadens- oder Versagenskriteriums führt, dient als Bemessungsgrundlage für schwingend beanspruchte Bauteile. Versagenskriterium kann das Erreichen der kritischen Rißlänge sein, die einen sofortigen Schwingbruch zur Folge hat, oder das Erreichen einer unzulässig großen Verformung infolge Schwingungskriechdeformation. Aufgabe der Schwingfestigkeitsforschung ist es daher, dem Konstrukteur diskrete Werkstoffkennwerte oder funktionelle Zusammenhänge über das Werkstoffverhalten unter schwingender Beanspruchung für eine gezielte Lebensdauervorhersage innerhalb des Konstruktionsprozesses bereitzustellen.

haben unverändert ihre Gültigkeit bewahren können. Sie beinhalten bereits die empirisch gewonnene Erkenntnis, daß eine von der Bruch-Schwingspielzahl N_B unabhängige Grenzspannung Dauerschwingfestigkeit σ_D als Werkstoffkennwert vorliegt und der Spannungsausschlag σ_A der Dauerschwingfestigkeit von der Mittelspannung σ_m abhängt.

Den Zusammenhang zwischen Spannungsausschlag σ_a und Bruch-Schwingspielzahl N_B für kubisch-raumzentrierte Metalle, also für die meisten Stähle und viele heterogene Legierungen, beschreibt die Wöhlerkurve vom Typ I. Die ersten (σ_a-N_B) -Diagramme stammen von L. Spangenberg nach eigenen und den von Wöhler tabellarisch festgehaltenen Schwingfestigkeits-Versuchsergebnissen [2].

2. Schwingungsbrüche an Schienenfahrzeugen – Anlaß systematischer Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Mit dem Ausbau des Eisenbahnnetzes im aufkommenden industriellen Zeitalter war es eine vorrangige Ingenieuraufgabe, dem häufigen Versagen von Eisenbahnwagenachsen durch Achsbruch entgegenzutreten. A. Wöhler gelang es, auf experimentellem Wege durch systematische Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl [1], die er an den von ihm konzipierten "Apparaten zum Zerreißen, Biegen und Verwinden durch wiederholte Belastung" in der Zentral-Werkstatt der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d.O. durchführte, das vom quasistatischen, also für zügige Beanspruchung geltenden Werkstoffkennwert Zugfestigkeit abweichende Festigkeitsverhalten bei schwingender Beanspruchung aufzudecken. Die von Wöhler formulierten Festigkeitsgesetze:

Bemerkenswert ist, daß Wöhler die Beanspruchungsbedingung äußere Belastung mit Hilfe ebenfalls selbst entwickelter "Apparate zum Messen der Biegung und der Verdrehung der Achsen" während des Fahrbetriebs ermittelte. Die Dauerschwingversuche wurden entsprechend der ingenieurmäßigen Fragestellung als Vergleichs-Einzelversuche durchgeführt, um einerseits den Materialeinfluß nach Werkstoffart und Metallurgie für Gußeisen, Puddelstahl, Stahlguß und andererseits den Gestalteinfluß bei scharf abgesetzten oder allmählichen Querschnittsübergängen durch Hohlkehle von Achslagerzapfen zur Achse auf das Bauteilverhalten Dauerschwingfestigkeit von Eisenbahnwagenachsen zu ermitteln (Bild 1). Auch die Schwingbruchgefahr an Einspannstellen, etwa der des scharfkantigen Nabensitzes der kraftschlüssigen Achsen-Naben-Verbindung wurde von Wöhler erkannt, die örtliche Spannungserhöhung durch Überlagerung von Schrumpfspannung und Spannung infolge äußerer Belastung zutreffend angenommen und als konstruktive Maßnahme zur Verminderung der Kantenpressung die allmähliche Erweiterung der Nabenbohrung an den Enden vorgeschlagen. So gipfelten die Wöhlerschen Untersuchungen in der weit über das Ingenieurwissen der damaligen Zeit hinausgreifenden konstruktiven Gestaltungsregel:

"Schwingungen, bei denen die Differenz der sie einbegrenzenden Spannungen gewisse durch Versuche zu bestimmenden Maße nicht überschreitet, können selbst bei Spannungen, welche der absoluten Bruchgrenze naheliegen, dauernd stattfinden, ohne daß der Bruch eintritt."

"Welcher Art auch die Kräfte sein mögen, durch die ein Körper angespannt wird, immer läßt sich, wie in Vorstehendem, durch einfache Betrachtungen klar

und

"Die Spannungsdifferenzen, welche die Größe der

Anlage A. Versuche mit gedrehten Stäben.

Laufende No.	Größte Faser-	Zahl der Um-	Bemerkungen
	spannung	drehungen	
	Ctr.	bis zum Bruche	

Tabelle I.

Schniges Eisen, aus einer von der Gesellschaft Phönix im Jahre 1857 gelieferten Achse geschnitten.

Mit Hohlkehle abgesetzt.

1	320	56000
2	300	99000
3	280	183000
4	260	479000
5	240	909000
6	220	3632000
7	200	4917000
8	180	19186000
9	160	Nicht gebrochen, hat bis jetzt rund 70 Millionen Umdrehungen gemacht.

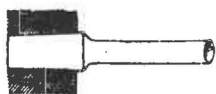


Tabelle II.

Das gleiche Material, scharf abgesetzt.

1	280	40000
2	260	58000
3	240	83000
4	220	224000
5	200	445000
6	200	409000
7	180	956000
8	180	535000
9	160	1386000
10	140	8999000

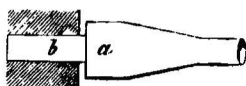


Bild 1

Prüfbericht des Umlaufbiegeversuchs am Bauteil Eisenbahnwagenachse nach Wöhler [1].

Übergang zum Stabschaft mit Hohlkehle und scharf abgesetzt, tabellarische Versuchsergebnisse Nennbiegespannung (sausschläge) in der äußeren Randfaser (Einspannwirkung durch Mehrachsichtigkeit des Spannungszustands am Stabrand nicht berücksichtigt) und Bruchschwingenspielzahlen, durchgeführt an Belastungsanordnung mit veränderlichem Biegemoment (Dreieckmoment) über der Prüfstrecke

nachweisen, daß alle plötzlichen Formänderungen, mit anderen Worten alle scharfen Absätze, eine die Festigkeit wesentlich beeinträchtigende Spannung herbeiführen und deshalb bei mechanischen Constructions unzweckmäßig sind. Wenn ungleiche Querschnitte erforderlich werden, muß man die Übergänge, wo es irgend thunlich ist, durch Curven vermitteln, welche tangential von dem schwächern Theil ausgehen. Ein möglichst flacher Kreisbogen wird für die Praxis als zweckmäßige Übergangsform genügen."

3. Das gekerbte Bauteil – Innere Einflußgröße ungleichförmige Spannungsverteilung auf die Schwingfestigkeit

Die Übertragbarkeit der vermittelten Werkstoffkennwerte von der idealisierten glatten und prismatischen Werkstoffprobe mit gleichförmiger (homogener) Spannungsverteilung und einachsigem Spannungszustand auf das technische Bauteil ist denn auch ein stetes Anliegen des Konstrukteurs an die Schwingfestigkeitsforschung

geblieben, um dem Ziel einer gesicherten Lebensdauervorhersage durch Festigkeitsrechnung näherzukommen. Konstruktionsteile weisen zahlreiche geometrische Diskontinuitäten infolge konstruktiv und fertigungstechnisch bedingter Kerben, Oberflächenrauigkeiten, Poren an Schweißnähten sowie innerer Kerben in Form metallurgisch bedingter Fehlstellen wie Mikrolunker und Schlackeneinschlüsse auf. Entsprechend bildet sich eine ungleichförmige (inhomogene) Spannungsverteilung sowie aufgrund gestaltbedingter Verformungsbehinderung ein mehrachsiger Spannungszustand über den Bauteilquerschnitt aus mit örtlichen Spannungserhöhungen an den Kerbstellen, von denen insbesondere bei schwingender Beanspruchung der Anriß ausgeht.

Entgegen der elementaren Festigkeitslehre beträgt die örtliche Maximalspannung bzw. bei Mehrachsichtigkeit die Maximalanstrengung im Kerbgrund ein je nach Kerbtiefe und Kerbschärfe Mehrfaches der Nennspannung bzw. Nennvergleichsspannung und wird für konstruktiv bedingte Kerben rechnerisch durch die Formzahl α_k erfaßt. Neben dem Formeinfluß führten A. Thum und W. Buchmann [3] die Kerbwirkung schwingend beanspruchter Bauteile auf einen von der Form unabhängigen Werkstoffeinfluß zurück, den sie rechnerisch durch die Kerbempfindlichkeitsziffer η_k berücksichtigen.

$$\eta_k = (\beta_k - 1) / (\alpha_k - 1) \tag{1}$$

Diese stellt das experimentell zu bestimmende Verhältnis der wirksamen zur theoretischen Spannungserhöhung im Kerbgrund dar und geht dem Werte nach für kerbunempfindliche Werkstoffe gegen 0 für sehr kerbempfindliche gegen 1. Entsprechend nimmt die Kerbwirkungszahl β_k als das Verhältnis der Dauerschwingfestigkeit des glatten zum gekerbten Stab den Wert 1 bzw. den von α_k an.

$$\beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1) \tag{2}$$

Im ersten Fall fehlender Kerbwirkung ist die Dauerfestigkeit des Kerbstabs gleich der des glatten Stabs, im zweiten Fall größtmöglicher Kerbwirkung ist die effektive Spannungsspitze gleich der elastizitätstheoretischen maximalen Spannung unter statischer Last. Um die einer Vielzahl von Einflüssen unterliegende Dauerschwingfestigkeit eines Kerbstabs in der Übertragbarkeit auf Bauteile beliebiger Gestalt, z.B. Kurbelwellen, zu erweitern, prägte A. Thum den Begriff der Gestaltfestigkeit [4].

Mit der konstruktiven Gestaltungsregel, die Ungleichförmigkeit der Spannungsverteilung an Querschnittsänderungen und Kraffteinleitungsstellen von vornherein zu umgehen, also durch konstruktive Maßnahmen die Spannungsspitzen möglichst zu vermindern, andererseits an gering beanspruchten Stellen unnötige Werkstoffanhäufungen zu vermeiden, strebte A. Thum die volle Werkstoffausnutzung durch Angleichen der Konstruktion an den "Körper gleicher Spannung" an. Lassen die konstruktiven Gegebenheiten keine günstige Kleinformgebung zum Abbau der Spannungsspitzen zu, besteht die Möglichkeit, höchstbeanspruchte Werkstoffzonen etwa mittels Aufbau eines günstigen Druckeigen Spannungssystems durch örtliche Wärmebehandlung oder Oberflächen drücken in der Festigkeit zu steigern. Man gelangt damit zum "Körper gleicher Festigkeit", der hinsichtlich des Widerstands gegen Versagen durch Schwingbruch dem "Körper gleicher Spannung" gleichwertig ist. Die Lehre von der Gestaltfestigkeit [5], die als die Lehre von der zweckmäßigen Kleinformgebung scheinbar nebensächlicher Formelemente wie Hohlkehlen, Bohrungen, Gewinde, Nuten u.a. angesehen

werden kann, vermochte mittels sorgfältiger Durchbildung im Einzelnen die Dauerschwingfestigkeit des meist kompliziert geformten Konstruktionsteils als Ganzes bedeutend zu erhöhen. Leichtbau und Hochleistungsübertragung durch hochbeanspruchte Maschinenteile etwa des Fahrzeug- und Flugzeugbaus, z.B. Flugmotor- und Rennwagenkurbelwellen wurden durch das "Konstruieren auf Gestaltfestigkeit" überhaupt erst ermöglicht (Bild 2).

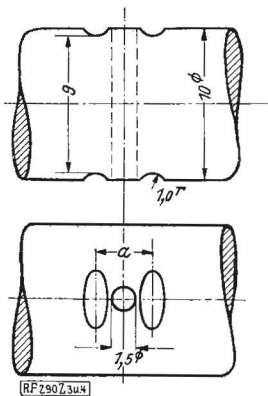


Bild 2
Entlastungskerbena als Verfahren zur Steigerung der Dauerschwingfestigkeit bei umlaufender Biegung nach Thum und Oschatz [30]. Tangentialkerben zum Abbau von Spannungsspitzen am Lochrand quergebohrter Rundstäbe mit Steigerung der Wechselfestigkeit bis zu 12 % bei günstigstem Kerbenabstand α

Die wirkliche Spannungsverteilung über den Bauteilquerschnitt kann mit erträglichem Aufwand vorausberechnet werden, wenn man sich auf idealisierte Kerbformen mit einfacher geometrischer Berandung beschränkt. Diese exakte Vorgehensweise der theoretischen Spannungsanalyse fand in der Neuberschen Kerbspannungslehre für die Grenzfälle des unendlichen breiten Stabs mit flachen Kerben und des unendlichen breiten Stabs mit sehr tiefen Kerben ihren Niederschlag [6].

Einerseits stößt die Gewinnung geschlossener Lösungen aus dem komplizierte Kerbformen endlicher Breite und Tiefe beschreibenden Gleichungssystem mathematisch auf Schwierigkeiten, andererseits ist die durch Diskretisierung eines kontinuierlichen Flächentragwerks mittels Stabwerk nach der Finit-Element-Methode (FEM) heute mögliche programmierte Berechnung für den Konstrukteur nicht in jedem Falle verfügbar. Insofern hat die von A. Thum gegebene orientierende Bemessungsgrundlage, die er selbst als eine der wichtigsten Schlußfolgerungen aus der Lehre von der Gestaltfestigkeit bezeichnete, nach wie vor ihre Berechtigung:

"Der Konstrukteur muß daher selbst versuchen, sich aufgrund seines physikalischen Gefühls in die Mechanik der Verformungsvorgänge und damit der Spannungsverhältnisse hineinzudenken und dadurch eine gewisse Klarheit über den Kraftverlauf und die Spannungsverteilung zu erlangen. Nur dann hat er Aussicht, seine Konstruktion von gefährlichen Spannungsspitzen zu befreien, wenn er imstande ist, sich ein genaues Bild von der Verformung seines Werkstücks unter der Wirkung angreifender Kräfte, im großen wie im kleinen und besonders an den gefährlichen Stellen, zu machen."

Die experimentelle Spannungsanalyse, die von der Messung der örtlichen Verformung mittels Dehnlinsen-, spannungsop-

tischen, Feindehnungsmeß- oder in jüngerer Zeit mittels Dehnungsmeßstreifen-Verfahren ausgeht, erlangte sehr bald Bedeutung, als ein wirksames Hilfsmittel zur Ermittlung der wirklichen Spannungsverteilung an komplizierten Bauteilen.

Die im Schwingfestigkeitsversuch ermittelte wirkliche Gestaltfestigkeit komplizierter Bauteile zeigte vielfach, daß die Kerbempfindlichkeitsziffer η_K nicht als Werkstoffkonstante anzusehen, sondern von der Kerbform abhängig ist und außerdem die Kerbwirkungszahl β_K den bei ungleichförmiger Spannungsverteilung auftretenden Größeneinfluß unterschiedlicher Querschnittsabmessungen unberücksichtigt läßt. Es wurden daher zur Vermeidung zeitraubender und kostspieliger Großversuche die Bemühungen um einen befriedigenden Ansatz zur Vorausbestimmung der Gestaltfestigkeit durch Festigkeitsrechnung fortgesetzt.

Die am glatten Biegestab mit linearem Spannungsgefälle als Sonderfall ungleichförmiger Spannungsverteilung ermittelte Biegefließgrenze, bei der die bleibende Formänderung von über 1 % an der höchstbeanspruchten Randfaser eintritt, liegt weit über der im Zugversuch ermittelten unteren Fließgrenze. Dies führten E. Siebel und M. Pfender [7] auf die Stützwirkung geringer beanspruchter Schichten in der Umgebung der neutralen Faser auf die höherbeanspruchten Schichten in der Nähe der Randfaser zurück. Aus der im Zugversuch ermittelten Fließgrenze läßt sich daher kein entsprechender Werkstoffkennwert für zügige Biegung und Verdrehung mit ungleichförmiger Spannungsverteilung gewinnen. Wegen häufig fehlender ausgeprägter Fließgrenze wurden bleibende Grenzdehnung, z.B. die Biegedehngrenze anstelle der Biegefließgrenze, für die Festigkeitsrechnung vorgeschlagen.

Auch an schwingend auf Biegung beanspruchten glatten Stäben zeigt sich eine Stützwirkung darin, daß die Biegeschwingfestigkeit einerseits größer als die Zug-Druck-Schwingfestigkeit bei gleichförmiger Spannungsverteilung ist, andererseits umso höher ansteigt, je kleiner der Stabdurchmesser wird [8]. Ähnliche dynamische Stützwirkungen zeigen sich bei der Verdreh-Schwingfestigkeit. Die Abhängigkeit der Biege- oder Verdreh-Schwingfestigkeit vom Stabdurchmesser läßt sich derart deuten, daß die Schwingfestigkeit in funktionellem Zusammenhang mit dem von der äußeren Belastung unabhängigen, nur durch Stabquerschnitt und -form bestimmten bezogenen Spannungs- und Dehnungsgefälle (Bild 3a) steht.

$$\chi = (1/\sigma) \cdot (d\sigma/dx) \text{ bzw. } (1/\tau) \cdot (d\tau/dx) \quad (3)$$

Dieses wird, gleichbleibende äußere Belastung vorausgesetzt, mit zunehmendem Stabquerschnitt kleiner und nähert sich dem die gleichförmige Spannungsverteilung kennzeichnenden Grenzwert 0 (Bild 3b). Da die Grundbeanspruchungsarten Biegung und Verdrehung auf den einfachen Sonderfall ungleichförmiger Spannungsverteilung mit konstantem Spannungsgefälle führen, liegt die Vermutung nahe, daß die beobachteten Gesetzmäßigkeiten auf andere Fälle ungleichförmiger Spannungsverteilung mit nicht konstantem Spannungsgefälle, insbesondere auf gekerbte Stäbe und somit auf Bauteile übertragbar sind. Dies erlaubt bei Kenntnis des Festigkeitsschaubilds als der funktionellen Abhängigkeit Schwingfestigkeit von bezogenem Spannungsgefälle in Diagrammform $\sigma_w = f(\chi)$ (Bild 3c), die Festigkeitsrechnung bei ungleichförmiger Spannungsverteilung in einfacher Weise durchzuführen, indem die effektive Spannung an den höchstbeanspruchten Stellen mit genügender Sicherheit unter dem

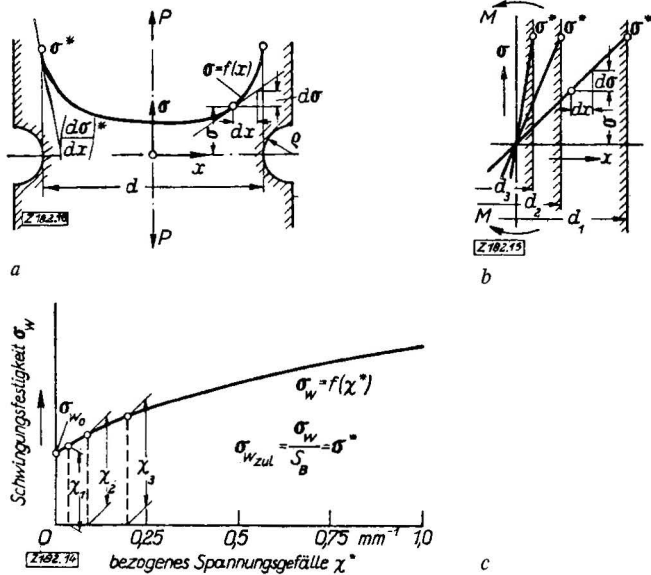


Bild 3
Wirkzusammenhang zwischen Schwingfestigkeit und Spannungsgefälle nach Siebel und Pfender [7, 8, 31].

- Kennzeichnung des Beanspruchungszustands von gekerbten Stäben durch Anstrengung und Spannungsgefälle an höchstbeanspruchter Stelle
- Änderung des Spannungsgefälles bei Biegebeanspruchung in Abhängigkeit vom Querschnitt
- Festigkeitsschaubild als funktionaler Zusammenhang Dauerschwingfestigkeit (Wechselspannung) und auf Spannungshöchstwert im Kerbgrund bezogenes Spannungsgefälle

Schwingfestigkeitswert bleibt, der dem an dieser Stelle vorliegenden Spannungsgefälle zugeordnet ist. Von bisherigen Berechnungsverfahren der Kerbwirkung unterscheidet sich dieser Ansatz dadurch, daß neben dem Spannungshöchstwert σ_{\max} auch das Spannungsgefälle χ in die Rechnung einbezogen wird und an die Stelle eines diskreten Werkstoffkennwerts das mittels Festigkeitsschaubild gekennzeichnete kontinuierliche Werkstoffverhalten tritt. Die dargelegte Festigkeitstheorie trägt dem beobachteten Größeneinfluß, der fehlenden Modellähnlichkeit bei Schwingbeanspruchung und der Kerbempfindlichkeit der Werkstoffe Rechnung. Um sie technisch anwenden zu können, sind die Festigkeitsschaubilder bei schwingender Beanspruchung der verschiedenen Werkstoffe zu ermitteln und die den Formziffern α_k zugeordneten Kennwerte für das bezogene Spannungsgefälle im Kerbgrund festzulegen [29]. Da bei den gebräuchlichsten Bauelementen im Maschinenbau Spannungsgefälle in einem Bereich von mindestens 3 Größenordnungen auftreten, ist die logarithmische Auftragung zweckmäßig. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Schwingfestigkeit durch die auftretende Stützwirkung höchstens auf einen Betrag angehoben werden kann, der der Ungleichförmigkeit des Spannungszustands im höchstbeanspruchten Querschnitt entspricht [9]. E. Siebel und K.H. Bußmann [10] konnten nun die von R.E. Peterson [11] an Sonderfällen gefundene Tatsache auf eine größere Zahl von Kerbproblemen erweitern, daß nämlich das Spannungsgefälle χ anscheinend im wesentlichen nur vom Kerbausrundungsradius ρ abhängt. Da alle Werkstoffe mehr oder weniger mit Gefüge-Inhomogenitäten und Fehlstellen durchsetzt sind, die gleichförmige Spannungsverteilung glatter Stäbe also von Mikrolast- und -eigenspannungen überlagert ist, wird die innere Kerbwirkung durch ein Modell berücksichtigt, das an der elastizitätstheoretisch höchstbeanspruchten Stelle eine kleine als Bohrung gedachte

Kerbe enthält (Bild 4). Ausgehend von dieser Theorie der Ersatzkerbe hat C. Peterson [12] einen Berechnungsansatz für die Kerbwirkungszahl β_k aufgestellt, der als einzige Werkstoffkonstante den "Radius der Ersatzkerbe" ρ^* und in α_k und χ^* den Einfluß von Form und Abmessungen der Probe aufweist.

$$\beta_k = [(1 + \sqrt{\rho^* \chi_{\text{glatt}}}) / (1 + \sqrt{\rho^* \chi_{\text{gekerbt}}})] \alpha_k = g(\rho^*, \chi) \cdot \alpha_k \quad (4)$$

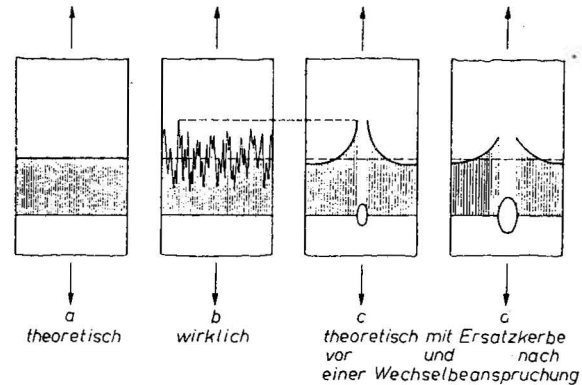


Bild 4
Modell zur Theorie der Ersatzkerbe nach C. Peterson [12].

- elastizitätstheoretische Spannungsverteilung
- sich überlagernde Mikrolast-, Submikrolast- und Eigenspannungen
- die gefährlichste Mikrospannungsspitze nachbildende Ersatzkerbe
- Ersatzkerbe plastisch verformt unterhalb Fließgrenze infolge Ermüdungsschädigung

Festigkeitsberechnungen nach diesem Ansatz ergeben in Übereinstimmung mit Versuchs- und Erfahrungswerten, daß der hochfeste Stahl sehr viel stärker auf Kerbwirkung anspricht als der weiche Stahl oder gar Grauguß bei geringen Abmessungen. Auf der anderen Seite kommt jedoch der Größeneinfluß beim hochfesten Stahl sehr viel weniger zum Ausdruck als z.B. bei Grauguß. H. Neuber schlägt mit der Theorie der Mikro- und Makrostützwirkung [13] eine Festigkeitsrechnung vor, die von der werkstoffstrukturbestimmten Mikrostützwirkung (Spannungsmittelwerttheorie) und der durch Abweichungen vom linearen Spannungs-Dehnungsgesetz bedingten Makrostützwirkung (nichtlineare Schubtheorie) ausgeht. Die Mikrostützwirkung ist nur im Bereich der Dauerschwingfestigkeit gültig, weil dort noch keine plastische Verformung im Kerbgrund angenommen werden muß. Im Zeitfestigkeitsbereich tritt hingegen durch Teilplastifizierung eine scheinbare Entlastung der Randzone ein, die als Makrostützwirkung bezeichnet wird. Die elastizitätstheoretische Formzahl α_k ergibt sich im nichtlinearelastischen (plastischen) Bereich als geometrisches Mittel

$$\alpha_k = \sqrt{\alpha_\sigma \alpha_\epsilon} \quad (\text{Neuber-Gleichung}) \quad (5)$$

des Spannungskerbefaktors (Faktors der Spannungskonzentration)

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_N \quad (6)$$

und des Dehnungskerbefaktors (Faktors der Dehnungskonzentration)

$$\alpha_\epsilon = \epsilon_{\max} / \epsilon_N \quad (7)$$

Durch Multiplikation mit $\sigma_N \cdot \epsilon_N$ ergibt sich aus Gl. (5) mit $\sigma = \sigma_{\max}$ und $\epsilon = \epsilon_{\max}$ in Gl. (6) und (7)

$$\sigma \cdot \epsilon = \alpha^2 \sigma_N \epsilon_N \quad (8)$$

Bei Berücksichtigung der Mikrostützwirkung tritt an die

Stelle der elastizitätstheoretischen Formzahl $\bar{\alpha}_k$ (Hookescher Kerbfaktor α_H) der reduzierte Kerbfaktor $\bar{\alpha}$, den man unter Zugrundelegung des fiktiven Krümmungsradius ρ_F erhält. Dieser setzt sich aus dem kleinsten Krümmungsradius ρ am Rand der höchstbeanspruchten Stelle und einer kleinen Zusatzlänge s_ρ^* (Ersatzstrukturlänge s^* , dimensionsloser Faktor s) zusammen. Sind $\bar{\alpha}$ und die Nennspannung σ_N gegeben, wird ferner die Nenndehnung ϵ_N aus der Spannungs-Dehnungslinie abgelesen, so ist die rechte Seite der Gleichung bekannt. Letztere stellt im σ, ϵ -Diagramm die Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel dar. Im Schnittpunkt der Hyperbel mit der Spannungs-Dehnungslinie können σ und ϵ abgelesen werden, Bild 5.

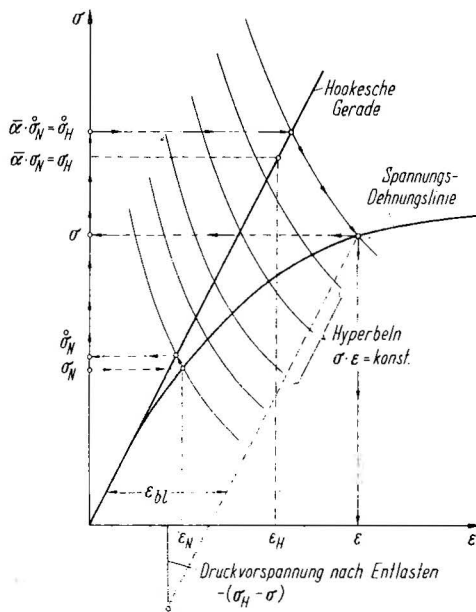


Bild 5
Makrostützwirkung und Theorie der nichtlinearen Spannungskonzentration nach Neuber [13].
Spannungs-Dehnungslinie (σ, ϵ -Diagramm) und Schar gleichseitiger Hyperbeln $\sigma \cdot \epsilon = \text{konst.}$, Ersatznennspannung $\hat{\sigma}_N$ auf der Hookeschen Geraden, ausgehend von der Nennspannung σ_N auf der Spannungs-Dehnungslinie, Ersatzwert der Hookeschen Spannung $\hat{\sigma}_H = \bar{\alpha} \hat{\sigma}_N$ errechnet Gl. (8), Spannungswert $\hat{\sigma}_H$ längs Hyperbel zur Spannungs-Dehnungslinie zurückgeführt, Schnittpunkt bezeichnet wirkliche Werte von Spannung σ und Dehnung ϵ

Nach der Mittelwert- und Schubtheorie verbindenden Beziehung Gl. (8) ist es möglich, einen glatten Stab wie ein Werkstoffvolumen in einer Kerbe zu beanspruchen und aus dem Schnittpunkt einer das Produkt $\Delta\sigma_k \Delta\epsilon_k$ beschreibenden gleichseitigen Hyperbel mit der Spannungs-Dehnungslinie die Kerbgrundspannung σ_{\max} mit zugehörigem ϵ_{\max} in 1. Näherung zu ermitteln (Neuber-Verfahren)

$$(\beta_k \Delta\sigma_N)^2 / E = \text{konst.} = \Delta\sigma_k \Delta\epsilon_k \quad (9)$$

Die Bestimmung der elastisch-plastischen Kerbbeanspruchung auf der Grundlage der Fließbruchmechanik mit Hilfe von Näherungsverfahren etwa der Methode finiter Elemente (FEM) [25] hat eine gute Übereinstimmung mit dem Neuber-Verfahren ergeben.

Da jedoch der Zerrüttungsmechanismus von der Kerbform abhängig und anstelle der monotonen statischen Spannungs-Dehnungskurve die zyklische Spannungs-Dehnungskurve in Ansatz zu bringen ist, läßt es sich ggf. nicht umgehen, den örtlichen Spannungs-Dehnungsverlauf im Kerbgrund durch

experimentelle Spannungsanalyse, z.B. im Begleitprobenverfahren [14] zu ermitteln.

4. Das einstufig bis zufallsartig schwingbeanspruchte Bauteil – Äußere Einflußgröße Beanspruchungs-Zeitablauf

Zieht man für Bauteile die Zeitfestigkeit als Bemessungsgrundlage heran, läßt also Beanspruchungsüberschreitungen der Dauerfestigkeit während des Betriebs zu, ergibt sich die Möglichkeit der gezielten Lebensdauerbegrenzung des Bauteils knapp über die Nutzungsdauer der Gesamtkonstruktion. Die Zulassung von Schwingbeanspruchungen auf höherem Beanspruchungshorizont im Zeitfestigkeitsbereich führt zu besserer Werkstoffnutzung bzw. werkstoffsparender Bemessung, also zu mechanisch hochbeanspruchten Bauteilen des konstruktiven Leichtbaus. Nahezu alle schwingend beanspruchten Bauteile, insbesondere solche des Fahrzeug- und Flugzeugbaus, sind jedoch nicht determinierten Einstufenbeanspruchungen gleichbleibender Amplitude sondern mehr oder weniger zufällig schwankenden Betriebsbeanspruchungen ausgesetzt.

Die Bemessung auf Betriebsfestigkeit geht daher von dem Beanspruchungskollektiv aus, das durch Klassierverfahren aus dem örtlich gemessenen tatsächlichen Beanspruchungs-Zeitablauf gewonnen wird. Die im Wöhler-Versuch um eine Mittelbeanspruchung als Bezugshorizont schwingende konstante Beanspruchungsamplitude kennzeichnet den Einstufenversuch und führt nach statistischer Auswertung auf die Kollektivform mit Rechteckverlauf. Demgegenüber sind die aus Betriebsbeanspruchungen gewonnenen Amplitudenkollektive von geringem Volligkeitsgrad, lassen also für gleiche Schwingspielzahlen bis Schädigung durch Anriß oder Versagen durch Schwingbruch höhere ertragbare Beanspruchungsamplituden zu als der Zeitfestigkeit bei Einstufenbeanspruchung entspricht.

Damit wird der durch geeignete Werkstoffwahl und -behandlung gekennzeichnete Stoff-Leichtbau und der durch beanspruchungsgerechte Gestaltung bestimmte Form-Leichtbau um eine dritte Komponente ergänzt, den durch Zugrundelegung des unregelmäßig schwankenden Betriebsablaufs als tatsächliche Bemessungslast erzielbaren Betriebsfestigkeits-Leichtbau.

Die Betriebsfestigkeitsrechnung bzw. die theoretische (hypothetische) Lebensdauervorhersage stützt sich auf Schädigungstheorien, die zur Aufstellung von Schadensakkumulationshypothesen führten. Durch Aufsummierung von Teilschädigungen auf unterschiedlichen Beanspruchungshorizonten ist es möglich, anhand von Bauteil-Wöhlerlinien, die im Einstufenversuch gewonnen wurden, die Schwingfestigkeit bei zufallsartigen Beanspruchungsabläufen zu berechnen. Auf der ältesten und bekanntesten Theorie der linearen Schädigung fußt die von A. Palmgren [15] für die Lebensdauerbeurteilung von Wälzlagern vorgeschlagene und von M.A. Miner [16] für den Flugzeugbau neu formulierte Bemessungsregel. Diese enthält als Schädigungsgrad bzw. Schädigungsfunktion das Verhältnis aufgebrachtener n_i zu Bruch-Schwingspielzahl je Spannungshorizont $N(\sigma_{a_i})$ (Teilschädigung). Bei Aufsummierung zum kumulativen Schwingspielquotienten (Schädigungssumme) (Bild 6) wird gerade dann der Zahlenwert 1 erreicht, wenn das dem Wöhlerversuch zugrundeliegende Versagenskriterium, z.B. Schwingbruch, eintritt.

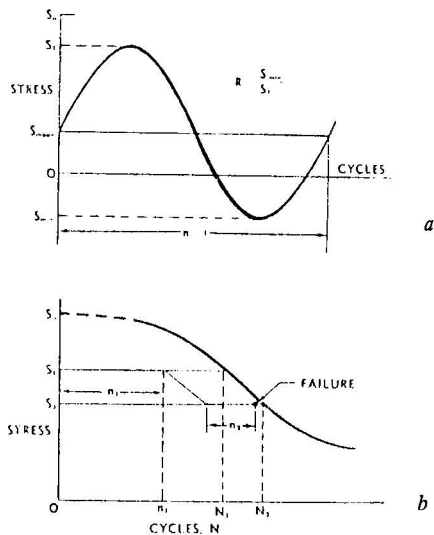


Bild 6
Darstellung der Begriffe zur linearen Schadensakkumulationshypothese nach Miner [16].

- a) Spannungs-Zeit-Schaubild eines angenommenen Schwingspiels, im Wechselbereich mit beliebigem Spannungsverhältnis $R = \sigma_u/\sigma_o (= S_{min}/S_1)$
- b) typische Wöhlerkurve in $(\sigma - N)$ -Darstellung (Oberspannung $\sigma_o = S_1$ über Bruchschwingspielzahl N_B) (S-N-curve) für vorgegebenes Spannungsverhältnis R , n_1 aufgebrauchte Schwingspielzahl, N_1 Bruchschwingspielzahl bei Oberspannung $\sigma_{o1} (= S_1)$, n_2 aufgebrauchte Schwingspielzahl bei Oberspannung $\sigma_{o2} (= S_2)$, für zwei Lastklassen (Spannungsniveaus), lineare Teilschädigungen, die als Summschädigungen zum Versagen durch Schwingbruch führen

$$\sum_i \frac{n_i}{N(\sigma_{ai})} = 1 \quad (10)$$

Wegen Streuung der Lebensdauervorhersage wurden zahlreiche modifizierte Akkumulationshypothesen entwickelt, die Schädigungen durch Einbeziehung von Spannungsamplituden unterhalb der Dauerschwingfestigkeit, z.T. auch die Reihenfolge auftretender Schwingspiele mit berücksichtigen, so die von Corten-Dolan [17], R.R. Gatts [18], E. Haibach [19], wie auch in neuerer Zeit andere, z.B. von D. schütz [20], die Eigenspannungseinflüssen auf den Schädigungsvorgang insbesondere bei überelastischer Beanspruchung im Kerbgrund Rechnung tragen.

Die Tatsache, daß örtliche Spannungsanalyse und Schadensakkumulationsrechnungen im Rahmen einer Konstruktion für eine große Anzahl von Bauteilen unter verschiedenen örtlichen Lastspektren ausgeführt werden müßten, z.T. auch, daß geeignete Bauteil-Wöhlerversuche fehlen, hat den experimentellen Lebensdauernachweis unentbehrlich gemacht. Dieser erfolgt mittels Betriebsfestigkeitsversuchs, der an Konstruktionen und Bauteilen vor der Freigabe zur Serienfertigung, z.B. am Kraftfahrzeugbauteil Achsschenkel, vorgenommen wird. War die theoretische Lebensdauervorhersage genügend zuverlässig, nach der die beanspruchungsgerechte Leichtbaugestaltung des Bauteils erfolgte, werden allenfalls noch geringfügige konstruktive Änderungen erforderlich sein. Umfangreiche Erfahrungen wurden mit dem von E. Gaßner [21] für die Belange des Flugzeugbaus entwickelten und vom Fahrzeugbau später übernommenen 8-Stufen-Blockprogrammversuch mit regelmäßigen Teilfolgen betriebsähnlicher Durchmischung gewonnen, der heute insbesondere zur Schwachstellenanalyse weiterhin Verwendung

findet. Die Entwicklung von Schwingprüfmaschinen mit elektrohydraulischen Schwingantrieben erlaubt das Erzeugen unregelmäßiger Versuchsbeanspruchungen hoher Wirklichkeitstreu. Bauteile können so Random-Versuchen mit weitgehend beliebiger zeitlicher Aufeinanderfolge von Schwingspielen bis zu Betriebslasten-Versuchen (Nachfahrversuchen) mit betriebsgleicher Simulation unterworfen werden. Insbesondere als Großversuch ist dieses Prüfverfahren jedoch recht aufwendig. Ergebnis des Betriebsfestigkeitsversuchs ist der funktionelle Zusammenhang zwischen Höchstwert der Beanspruchungskollektivs $\bar{\sigma}_a$ und Bruchschwingspielzahl \bar{N} bei vorgegebenem Spannungsverhältnis \bar{R} . Dieser Zusammenhang läßt sich bei statistischer Auswertung durch die Lebensdauerlinien konstanter Überlebenswahrscheinlichkeit P_{ij} wiedergeben mit der Zeit- und Dauerfestigkeitslinie des Wöhler-Versuchs als Grenzkurve des Betriebsfestigkeitsbereichs (Bild 7).

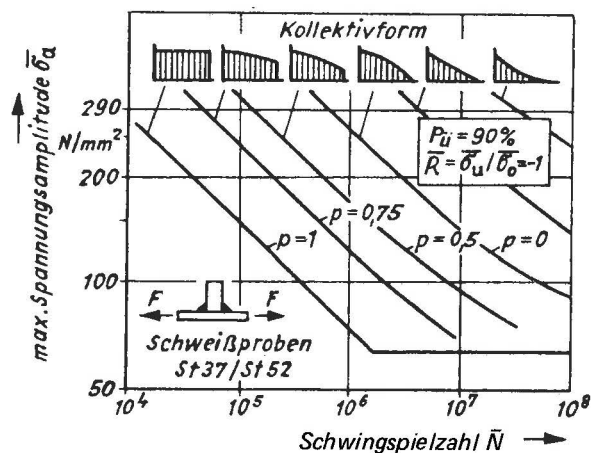


Bild 7
Einfluß der Kollektivform unterschiedlicher Volligkeit (p Kollektivbeiwert) auf ertragbare Spannungshöchstwerte nach Gaßner-Heibach-Griese [26, 32], Lebensdauerlinien ($P_{ij} = 90\%$ Überlebenswahrscheinlichkeit), ermittelt am wechselbeanspruchten ($\bar{R} = \bar{\sigma}_u/\bar{\sigma}_o = -1$) Spannungsniveaus) Bauteil mit aufgeschweißtem Quersteg

5. Linearelastische Bruchmechanik – Spezifische Einflußgröße Rißfortschrittverhalten

Der Schwingbruch ist Ausdruck abgeschlossenen Rißfortschritts. Der Widerstand des Werkstoffs gegen das subkritische Fortschreiten eines Anrisses unter Schwingbeanspruchung und die Restfestigkeit eines angerissenen Bauteils ist eine wichtige Eigenschaft bei der Auswahl der Werkstoffe sowie bei der Bestimmung der Inspektionsintervalle, und zwar nicht nur im Flugzeug-, sondern auch im Stahlbrücken-, Kran-, Druckbehälter- und Reaktorbau.

Die an die Rißentstehungs- sich anschließende Rißfortschrittphase kann bei kleinen Beanspruchungsamplituden bis zu 99 %, bei großen Amplituden u.U. weniger als 50 % der Gesamtlebensdauer eines Bauteils umfassen. Da man selbst mit modernen zerstörungsfreien Prüfverfahren das Unentdecktbleiben insbesondere von Mikroanrissen nicht ausschließen kann, andererseits bei vielen Konstruktionen – vom Flugzeug bis zum dickwandigen Druckbehälter – von vornherein mit dem Vorhandensein von Anrissen rechnen muß, kommt der quantitativen Beschreibung des Rißfortschritts große Bedeutung zu. Neben den experimentell ge-

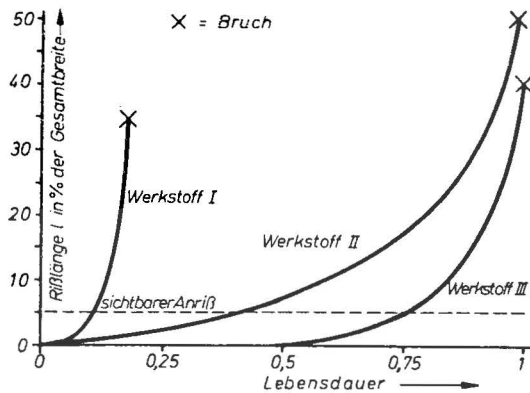


Bild 8

Rißfortschrittskurven, schematisch nach Schütz [27].

- Werkstoff I hoher statischer Formfestigkeit (z. B. hochfeste Aluminiumlegierung) mit frühem Rißbeginn und schnellem Rißfortschritt
- Werkstoff II (z. B. mittelfeste Aluminiumlegierung) mit langsamem Rißfortschritt
- Werkstoff III (z. B. Bauteil mit künstlich aufgebrachten Druck-eigenspannungen) mit spätem Rißbeginn und schnellem Rißfortschritt

wonnenen Rißfortschrittskurven (Bild 8) hat sich die linear-elastische Bruchmechanik um Herleitung theoretischer Ansätze aus dem Spannungsfeld um den Bereich der Rißspitze zur Beschreibung des Rißfortschrittverhaltens bemüht. So stellten F.C. Paris und F. Erdogan [22] zwischen dynamischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK und Rißausbreitungsgeschwindigkeit dl/dN einen funktionellen Zusammenhang (Bild 9) in Form eines Potenzgesetzes her.

$$dl/dN = C \Delta K^m \quad (11)$$

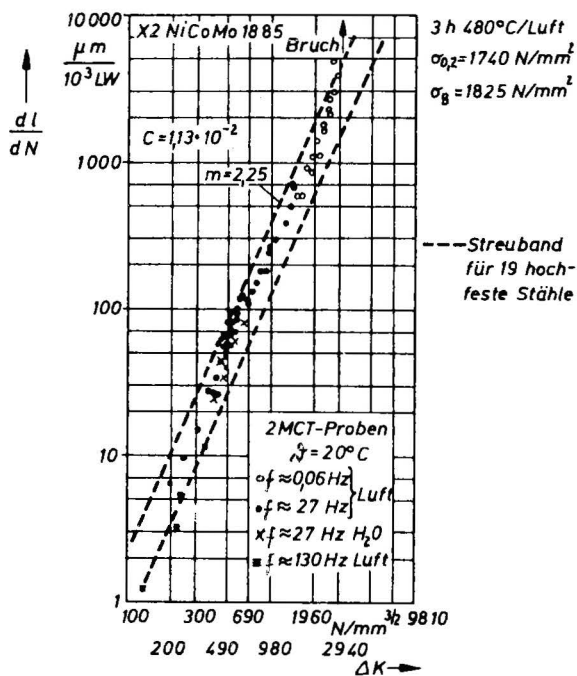


Bild 9

Rißausbreitungsgeschwindigkeit dl/dN in Abhängigkeit des dynamischen Spannungsintensitätsfaktors ΔK nach Paris und Erdogan [22], ermittelt an martensitaushärtendem Stahl mit bereits vollzogener Aushärtung [28]

Dieses Spannungsintensitätskonzept wurde inzwischen vielfach modifiziert, vor allem durch Berücksichtigung der

Mittelspannung [23] und des Randzonenphänomens der Bruchflächenschließung [24]. Außer im Flugzeugbau, wo der Rißfortschritt im Zusammenhang mit der Fail-Safe-Bauweise seit längerem Bedeutung erlangte, hat sich die bruchmechanische Betrachtungsweise auch bei der Beurteilung von Schweißfehlern bewährt.

6. Werkstoffphysik – Erforschung des Zerrüttungsmechanismus

Während Bemessungsgrundlagen für den gestaltenden Ingenieur bislang aus der vorangehend kurz umrissenen phänomenologischen Beschreibung des Schwingfestigkeitsverhaltens von Werkstoffen und Bauteilen gewonnen wurden, hat die werkstoffphysikalische Grundlagenforschung insbesondere durch Zurückführen der Verfestigung auf Bewegung und Wechselwirkung von Versetzungen, die zu plastischen Deformationen führen, zur ursächlichen Klärung des Zerrüttungsmechanismus beigetragen. Inwieweit sich für die ingenieurmäßige Anwendung lebensdauerorientierte Dimensionierungshilfen auf neuer Wissensgrundlage herleiten lassen, wird die Zukunft erweisen.

Literatur

- Wöhler, A.: 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. f. Bauwesen 13 (1863), S. 233 – 258 u. 16 (1866), S. 67 – 84; 20 (1970), S. 73 – 84
- Spangenberg, L.: Über das Verhalten der Metalle bei wiederholten Anspannungen. Z. f. Bauwesen 24 (1874), S. 473 – 496, 25 (1874), S. 77 – 100
- Thum, A., u. Buchmann, W.: Dauerfestigkeit und Konstruktion. ZA 16 VDI-Verlag, Berlin 1932 und Arch. E. W. 7 (1933/34), S. 627 – 635
- Thum, A.: Die Gestaltfestigkeit. Stahl und Eisen 55 (1935), S. 1025 – 29
- Thum, A.: Die Entwicklung der Lehre von der Gestaltfestigkeit. Z-VDI 88 (1944), Nr. 45/46, S. 609 – 615
- Neuber, H.: Kerbspannungslehre. Springer-Verlag, Berlin 1937
- Siebel, E., u. Pfender, M.: Neue Erkenntnisse der Festigkeitsforschung. Die Technik 2 (1947), Nr. 3, S. 117 – 121
- Siebel, E., u. Pfender, M.: Weiterentwicklung der Festigkeitsrechnung bei Wechselbeanspruchung. Stahl u. Eisen 66/67 (1947), H. 19/20, S. 318 – 321

- [9] Siebel, E., u. Meuth, H. O.:
Die Wirkung von Kerben bei schwingender Beanspruchung.
Z-VDI 91 (1949), Nr. 13, S. 319 – 324
- [10] Siebel, E., u. Bußmann, K. H.:
Die Technik 3 (1948), S. 249
- [11] Peterson, R. E.:
Timoschenko-Festschr. (1938), S. 179
- [12] Petersen, C.:
Die Vorgänge im zügig und wechselnd beanspruchten Metallgefüge.
Z. Metallkunde 42 (1951), S. 161 – 170 u. 43 (1952), S. 429 – 433
- [13] Neuber, H.:
Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen.
Konstruktion 20 (1968), H. 7, S. 245 – 251
- [14] Crews, J. H., u. Hardrath, H. F.:
A Study of Cyclic Plastic Stresses at a Notch Root.
Experimental Mechanics 23 (1966), S. 313 – 320
- [15] Palmgren, A.:
Die Lebensdauer von Kugellagern.
Z-VDI 58 (1924), H. 14, S. 339 – 341
- [16] Miner, M. A.:
Cumulative Damage in Fatigue.
J. of Appl. Mech. Trans ASME 12 (1945), H. 3, S. A-159 – A-164
- [17] Corten, H. T., u. Dolan, T. J.:
Cumulative Fatigue Damage.
Proc. of the International Conference on Fatigue of Metals. London, New York 1956, S. 235 – 246
- [18] Gatts, R. R.:
Application of a Cumulative Damage Concept of Fatigue.
Trans ASME, Ser. D., J. Basic Engng. 83 (1961), S. 529 – 540
- [19] Haibach, E.:
Modifizierte lineare Schadensakkumulationshypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung.
Techn. Mitt. d. Lab. f. Betriebsfestigkeit Nr. 50/70, Darmstadt 1970 und LBF Report S-94, 1969 – 1971
- [20] Schütz, D.:
Durch veränderliche Betriebslasten in Kerben erzeugte Eigenspannungen und ihre Bedeutung für die Anwendbarkeit der linearen Schadensakkumulationshypothese.
LBF-Bericht Nr. FB-100 (1972)
- [21] Gaßner, E.:
Festigkeitsversuche mit wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau.
Luftwissen 6 (1939), Nr. 2, S. 61 – 64
- [22] Paris, F. C., u. Erdogan, E.:
The Fracture Mechanics Approach to Fatigue.
J. Basic Engineering, Trans ASME, Vol. 85, Ser. D. (1963), S. 528 – 534
- [23] Forman, R. G. et al.:
Numerical Analysis of Crack Propagation Cyclically Loaded Structures.
J. Basic Engng. Trans ASME, Ser. D. 89 (1967), S. 459 – 465
- [24] Elber, W.:
Einfluß der plastischen Zone auf die Rißausbreitung unter Schwingbelastung.
Materialprüfung 12 (1970), S. 189 – 193
- [25] Seeger, T., u. Beste, A.:
Zur Weiterentwicklung von Näherungsformeln für die Berechnung von Kerbspannungen im elastisch-plastischen Bereich.
Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 5 Grund- und Werkstoffe, Nr. Düsseldorf: VDI-Verlag 1977
- [26] Gaßner, E., Giese, F. W., u. Haibach, E.:
Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweißverbindung aus Stahl St 37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs.
Arch. E. W., Gruppe D, Bd. 35 (1964), Nr. 3, S. 255 bis 267
- [27] Schütz, H.:
Schwingfestigkeit von Werkstoffen.
VDI-Ber. Nr. 214 (1974), S. 45 – 57
- [28] Fuchs, A.:
Untersuchung des subkritischen Rißwachstums mit Methoden der Bruchmechanik.
Materialprüf. Bd. 13 (1971), Nr. 6, S. 181 – 186
- [29] VDI 2226:
Empfehlung für die Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile.
Hier: Festigkeitsberechnung bei wiederholter Beanspruchung.
Juli 1965, S. 13 – 26
- [30] Thum, A., u. Oschatz, H.:
Steigerung der Dauerfestigkeit bei Rundstäben mit Querbohrungen.
Forsch. Ing. Wes. 3 (1932), H. 2, S. 87 – 93
- [31] Siebel, E.:
Neue Wege der Festigkeitsrechnung.
VDI-Z 90 (1948), Nr. 5, S. 135 – 139
- [32] Haibach, E.:
Probleme der Betriebsfestigkeit von metallischen Konstruktionsteilen.
VDI-Z. 113 (1971), Nr. 5, S. 397 – 403

Inhaltsangabe:

Das Erstarrungsverhalten von Zementpasten hat besondere Bedeutung für die Verarbeitbarkeit von Mörtel und Beton. Ein verbreitetes Prüfverfahren, das auch in zahlreichen Normen enthalten ist, wurde von L. Vicat entwickelt. Das nach ihm benannte Nadelpenetrationsverfahren wird beschrieben. Die mangelhafte Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Prüfwerte wird auf verschiedene Einflußfaktoren zurückgeführt, wie Inhomogenität der Paste, Wasserabsonderung, Zeitspanne bis zum Endwert der Nadel-Eindringtiefe, Temperatur, Wassermenge. Einige dieser Punkte werden anhand von Meßwerten erläutert. Der Einsatz eines automatischen Nadelgerätes führt zu merklichen Verbesserungen des Verfahrens; die genannten Einflußfaktoren können weitgehend ausgeschaltet bzw. konstant gehalten werden. Weiterhin wird über Untersuchungen berichtet, bei denen anstelle der Vicat-Nadel ein konischer Eindringkörper verwendet wird. Die Kurvenzüge, die die Eindringtiefe über der Zeit darstellen und die bei der Anwendung der Vicat-Nadel sehr steil verlaufen, werden beim Einsatz des Konus gestreckt. Unregelmäßigkeiten im Erstarrungsverlauf z.B. "falsches Erstarren" sowie Wirkungsweisen von Zusätzen werden dadurch besser erfaßt als durch die Vicat-Nadel. Hierzu sind allerdings noch weitere Versuche erforderlich.

Zementpaste – Prüfverfahren – Penetrationsverfahren

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines
70. Lebensjahres gewidmet

1. Einleitung

Wird ein Zement mit Wasser zu einer Paste "angemacht", werden physikalisch-chemische Prozesse in Gang gesetzt, die zum "Versteifen", "Erstarren" und schließlich "Erhärten" der Paste führen. Der zeitliche Ablauf derartiger Vorgänge ist für die Baupraxis von besonderer Wichtigkeit, da hiervon die Zeitspanne abhängig ist, in der eine Paste, ein Mörtel oder ein Beton verarbeitbar ist.

2. Prüfung nach Vicat

Eines der ältesten Verfahren, den Zeitpunkt des "Erstarrens" oder, wie es früher hieß, des "Abbindens" zu bestimmen, wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Louis Vicat entwickelt. Hier wurde die Zeitspanne festgestellt, nach der eine rechtwinklig abgeschnittene Stahlnadel von 1,2 mm unterem Durchmesser und 300 g Masse nicht mehr unter ihrem Eigengewicht in die Paste oder den Mörtel einzudringen vermochte [1]. Dieses Verfahren setzte sich, z.T. mit geringfügigen Modifikationen, weltweit durch. In Deutschland wurde es in der ersten preußischen Zementnorm aus dem Jahre 1878 beschrieben [2] und findet sich noch heute in der derzeit gültigen Zementnorm DIN 1164 aus dem Jahre 1970 in nahezu unveränderter Form [3]. Ausgehend von einer Zementpaste mit "Normsteife", die mit derselben Vorrichtung, jedoch einem zylindrischen Tauchstab von 10 mm Durchmesser bei bestimmter Eindringtiefe überprüft wird, wird die Eindringtiefe einer Nadel von 1,13 mm Durchmesser – das entspricht einer Querschnittsfläche von 1 mm^2 – und 300 g Masse unter der Wirkung des Eigengewichts ermittelt. Als Erstarrungsbeginn ist der Zeitpunkt definiert, bei dem die Nadel nur noch 35 - 37 mm in die in einer 40 mm hohen Form befindlichen Paste eindringt, als Erstarrungsende derjenige, bei dem die Nadel höchstens 1 mm tief eindringt. Die Form besteht aus einem konischen Hartgummiring, der auf eine Glasplatte aufgesetzt und nach Erstarrungsbeginn der Paste gewendet wird, so daß die Unter-

seite der Probe der weiteren Nadelpfung bis zum Erstarrungsende ausgesetzt wird.

Die Vorzüge des Verfahrens liegen vor allem im sehr geringen geräte- und versuchstechnischen Aufwand. Demgegenüber stehen Nachteile hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse und der damit verbundenen Einschränkung der Aussagefähigkeit der Werte. Ergebnisse von Ringversuchen gaben Anlaß zu Untersuchung der Einflußfaktoren und Fehlermöglichkeiten mit dem Ziel, das Prüfverfahren hinsichtlich erhöhter Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Meßwerte weiterzuentwickeln.

3. Einflüsse auf die Meßergebnisse

Systematische Messungen der Eindringtiefe der Vicat-Nadel an verschiedenen Stellen normgerecht hergestellter Proben ergaben sehr starke Schwankungen der Werte. Die in *Bild 1* dargestellten Meßwerte, die an einem Zement mit langsamem Erstarrungsverlauf zu jeweils vier verschiedenen Zeiten ermittelt wurden, lassen erkennen, welchen Zufälligkeiten Einzelwerte unterliegen können. In erster Linie dürften Inhomogenitäten der Paste, die vor allem durch das Einbringen in die Form hervorgerufen werden, als Ursache gelten.

Eine Verbesserung konnte durch Verdichten der Paste auf dem Rütteltisch nach DIN 1164 erzielt werden. Dabei erwiesen sich bei einer Amplitude von 0,35 mm Rüttelzeiten von mindestens 60 s als günstig. Anstelle des Hartgummiringes wurde eine verschraubbare Messingform mit gleichen Abmessungen verwendet. Dadurch wurde auch die beim Normversuch zwischen Hartgummiring und Glasplatte vielfach auftretende, unkontrollierte Wasserabsonderung unterbunden.

Untersuchungen des zeitlichen Ablaufs der Nadelpenetrations zeigten, daß der Zeitpunkt des Ablesens der Eindringtiefe wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis haben kann. Die Nadel dringt zunächst mit einer hohen, nahezu konstanten Anfangsgeschwindigkeit in die Paste ein. Werte von 35 cm/s (bei Erstarrungsbeginn) bis 4 cm/s (20 min vor Erstarrungsende) wurden gemessen. Bei einer bestimmten Eindringtiefe, die vom jeweiligen Zustand der Paste abhängt, verringert sich die Eindringgeschwindigkeit kontinuierlich oder oftmals

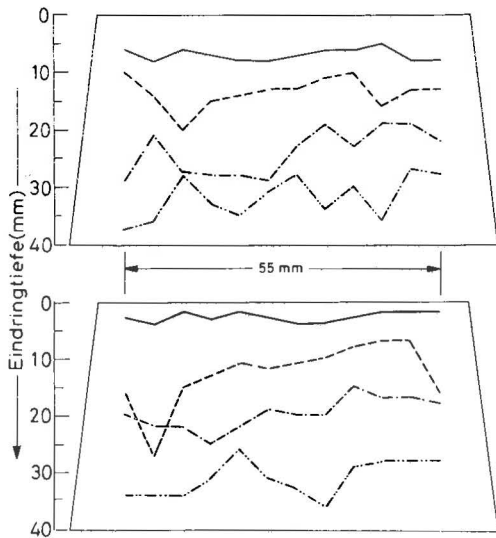


Bild 1

Verteilung der Eindringtiefen der Vicat-Nadel über den Querschnitt zweier Zementproben, gemessen zu je 4 verschiedenen Zeiten während des Erstarrens

diskontinuierlich, bis schließlich die Nadel annähernd zum Stillstand kommt. Dieser Vorgang kann sich über einen Zeitraum bis zu 3 min erstrecken. Zum Beispiel wurde an einer Zementpaste 10 s nach Penetrationsbeginn eine Eindringtiefe von 30 mm registriert, während sie nach 95 s bereits 36 mm und nach 150 s 38 mm betrug. Vielfach wurde auch ein "Nachsacken" der Nadel beobachtet, nachdem scheinbar schon der Endwert der Eindringtiefe erreicht worden war.

Da das Erstarren auf dem thermodynamischen Vorgang der Hydratation des Zementes beruht, wird die Erstarrungszeit, d.h. die Reaktionsgeschwindigkeit, maßgeblich von der Temperatur beeinflusst, bei der die Reaktion abläuft. Diese hängt wiederum von der Temperatur der Ausgangsstoffe Wasser und Zement, der Umgebungstemperatur und der freiwerdenden Hydratationswärme ab. Obwohl letztere in dem in

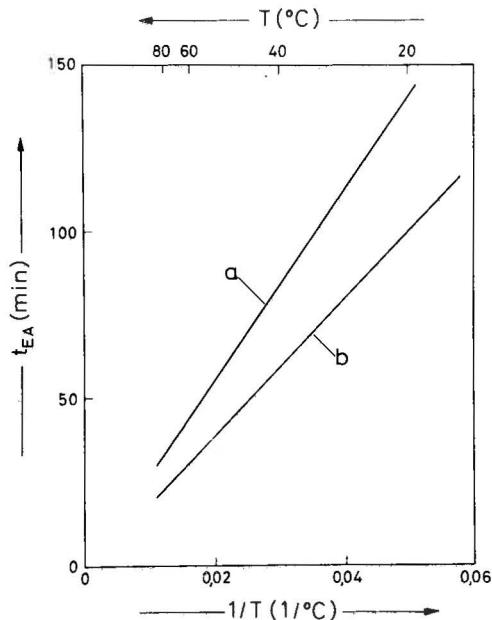


Bild 2

Abhängigkeit der Zeit des Erstarrungsanfangs t_{EA} von der Umgebungstemperatur T , ermittelt an einem PZ 350 F (a) und an einem PZ 550 (b)

Frage stehenden Zeitraum gering ist, lassen sich Unterschiede in den Erstarrungszeiten bei unterschiedlicher Wärmeabfuhr – beispielsweise dickwandiger und dünnwandiger Messingform –, jedoch sonst gleichen Versuchsbedingungen nachweisen. Welchen Einfluß die Umgebungstemperatur auf die Erstarrungszeiten haben kann, zeigt Bild 2. Hier wurde die Nadelprüfung an Pasten, die bei Raumtemperatur hergestellt wurden, bei Umgebungstemperaturen bis zu $+80^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. In guter Näherung ergab sich eine lineare Abhängigkeit der Erstarrungszeit vom Reziprokwert der Temperatur in $^{\circ}\text{C}$. Demzufolge würde bei dem untersuchten PZ 350 F z.B. eine Temperaturerhöhung von 20°C auf 22°C eine Verkürzung der Erstarrungszeit um 13 min bewirken. Die Versuchsbedingungen – Probengröße, Formmaterial etc. – spielen dabei ebenso eine Rolle wie die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Zementes. Die Umgebungstemperatur und die der Ausgangsstoffe sollten daher bei gleichbleibenden Werten liegen, obwohl die Norm den Spielraum von 18°C bis 22°C läßt.

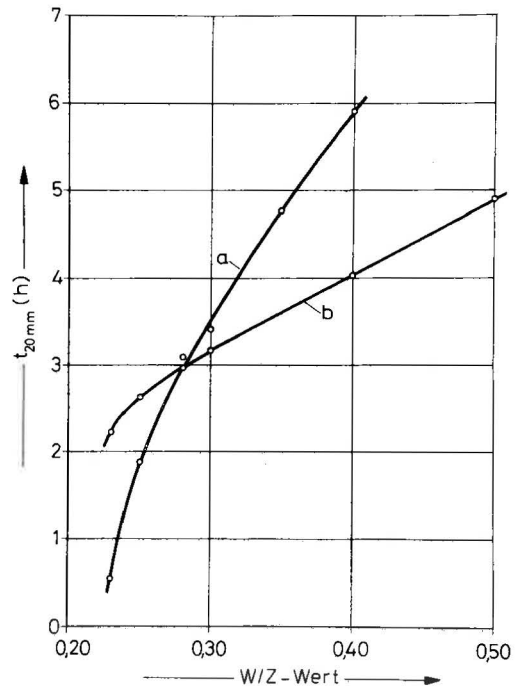


Bild 3

Erstarrungszeiten $t_{20\text{ mm}}$ – ermittelt bei der Eindringtiefe der Vicat-Nadel von 20 mm – zweier PZ 450 F in Abhängigkeit vom W/Z-Wert

Das Verhältnis Wasser zu Zement (W/Z-Wert) beeinflusst nicht nur die Ausgangskonsistenz, sondern vor allem den Reaktionsablauf, von dem die Erstarrungszeiten abhängen. In Bild 3 sind für zwei verschiedene PZ 450 F die Zeiten, bei denen die Vicat-Nadel nur noch 20 mm in die Paste eindringt, über dem W/Z-Wert aufgetragen. Wegen des s-förmigen Verlaufs der Eindringtiefen-Zeit-Kurven (vgl. Bild 4 oben) sind die Zeiten für Eindringtiefen zwischen 10 mm und 30 mm exakter zu bestimmen als z.B. die Zeiten für Erstarrungsbeginn und -ende. Es ist zu erkennen, daß die Erstarrungszeiten je nach Zementart mehr oder minder stark zunehmen, wenn das Wasserangebot steigt. Hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeiten wurden gleiche Tendenzen bei kalorimetrischen Messungen an denselben Zementen gefunden. Man kann daher die mit der Vicat-Nadel gemessenen Erstarrungszeit-Verlängerungen bei erhöhtem Wasserange-

bot nicht allein auf die veränderte Ausgangskonsistenz, sondern auch auf die geringere Reaktionsgeschwindigkeit zurückzuführen.

4. Mögliche Verbesserungen des Prüfverfahrens

Die bisher aufgeführten Fehlermöglichkeiten der Erstarrungsmessung mit dem Nadelgerät nach Vicat führten zum Einsatz eines automatisch arbeitenden Nadelgerätes vom Typ "Prisomètre", das zuvor einigen technischen Verbesserungen unterzogen worden war. Beim Prisomètre werden die mit einem Schreibstift versehenen Nadeln zusammen mit der Schreibwalze in regelmäßigen Zeitabständen abgesenkt. Sobald die Zementpaste der Nadel Widerstand leistet, führt die Nadel gegenüber der Schreibwalze eine vertikale Relativbewegung aus, die als Linie aufgezeichnet wird. Die Länge der Linie entspricht der Differenz von Höhe der Zementpaste und Eindringtiefe der Nadel (vgl. Bild 4 oben). Das mit gleichbleibender Geschwindigkeit von ca. 0,5 cm/s erfolgende Absenken der Nadeln und das unmittelbar darauffolgende Wiederanheben mit derselben Geschwindigkeit verhindert den zeitlichen Ablesefehler der Eindringtiefe, deren Wert zudem direkt auf Millimeterpapier aufgezeichnet wird. Aufgrund der durch eine Zeituhr einstellbaren regelmäßigen Penetration kann eine Ausgleichskurve der Eindringtiefen dargestellt werden, die exakte Zeitbestimmungen des Erstarrens ermöglicht. Ferner können die Messingformen mit der Zementpaste während der Versuchsdurchführung im Wasserbad temperiert werden.

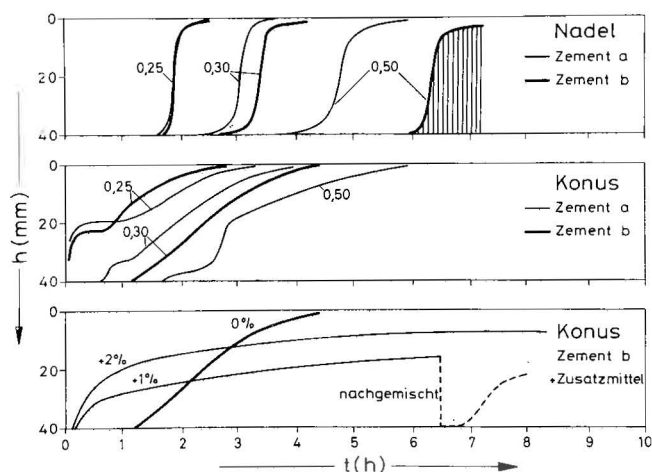


Bild 4

Eindringtiefen h in Abhängigkeit von der Zeit t , gemessen mit dem Prisomètre an zwei PZ 450 F bei W/Z-Werten von 0,25; 0,30 und 0,50 sowie unter Zusatz eines Erstarrungsverzögerers

Nach bisherigen Erfahrungen kann die Übereinstimmung der Meßergebnisse des genormten Vicat-Gerätes und des Prisomètre als gut bezeichnet werden. Das Prisomètre liefert Werte von besserer Reproduzierbarkeit, da subjektive Fehler bezüglich der Messung von Eindringtiefe und Zeit unterbunden werden. Dennoch konnten auch diese Messungen nicht immer befriedigen, beispielsweise bei Zementen, die zum raschen Ansteifen oder zum "falschen Erstarren" neigen. Daher wurden Versuche mit dem in DIN 1168 für die Gipsprüfung vorgeschriebenen Tauchkonus als Penetrationskörper durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen Kegelpfropf von 45 mm Höhe, 1 mm unterem und 8 mm oberem Durchmesser.

Die Messungen mit der Vicat-Nadel täuschen einen Erstarrungsverlauf vor, der nach einer mehrstündigen "Ruhepause" innerhalb von 20 - 70 min von einer plastischen Masse zu einem Festkörper (bei Erstarrungsende) führt. Die Versuche mit dem Konus sowie anderen Penetrationskörpern zeigen jedoch, daß das Erstarren einer Zementpaste i.a. ein kontinuierlicher Vorgang ist [4], der unmittelbar nach dem Anmachen einsetzt (vgl. Bild 4, Mitte). Der Konus führt zu einer zeitlich stark gestreckten Erstarrungsverlauf-Kurve, was vor allem auf das mit der Eindringtiefe überproportional wachsende Volumen der jeweils verdrängten Masse zurückzuführen ist. Der für die Verarbeitbarkeit wesentliche Ablauf der Konsistenzänderung wird damit deutlicher. Ferner treten Abweichungen vom normalen Kurvenverlauf (Zement b in Bild 4, Mitte) z.B. bei "falschem Erstarren" (Zement a) auf, was von der Nadelpenetration (Bild 4, oben) nicht erfaßt wird.

Weiterhin läßt der mit dem Konus gemessene Erstarrungsverlauf bessere Aussagen hinsichtlich der Wirkungsweise von Zusätzen zu. In Bild 4 (unten) sind die Erstarrungskurven bei Zusatz eines Erstarrungsverzögerers in der laut Angabe größten zulässigen Zusatzmenge von 2 % bzw. 1 %, bezogen auf die Zementmasse, dem Nullversuch gegenübergestellt. Die mit 1 % Verzögerer versetzte Paste wurde nach 6,5 h intensiv durchgemischt und erneut geprüft. Die Nadelprüfung ergab nach 9,5 h noch keinen Erstarrungsbeginn, der beim Nullversuch bei 3,2 h lag. Die Konusprüfung dagegen zeigte ein rasches Ansteifen der Paste an, die ohne intensives Nachmischen nicht mehr einwandfrei verarbeitbar war. Auch eine nachgemischte Probe wies nach einer weiteren halben Stunde wiederum den Ansteifungseffekt auf.

Die Untersuchungen mit dem Konus werden fortgesetzt, da weitere Aufschlüsse über Störungen des Erstarrungsverhaltens von Zementpasten erwartet werden. Da der Konus bereits in einer Bindemittelnorm enthalten ist, soll vorerst auf Versuche mit anderen Penetrationskörpern verzichtet werden.

Literatur

- [1] Vicat, L.: Résumé des connaissances positives actuelles sur les qualités, le choix et la convenance réciproque des matériaux propres à la fabrication des mortiers et ciments calcaires. Paris 1828.
Zit. in: Huberti, G. (Hrsg.): Vom Caementum zum Spannbeton. Bd. 1, Tl. A. Wiesbaden, Berlin 1964.
- [2] o.V.: Normen für die einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Cement. Mitt. Königl. techn. Versuchsanst. Berlin 1 (1883) 49 - 50.
o.V.: Normen für einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Cement. Mitt. Königl. techn. Versuchsanst. Berlin 5 (1887) 102 - 107.
- [3] DIN 1164 - Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement. Teil 5: Bestimmung der Erstarrungszeiten mit dem Nadelgerät. Aug. Juni 1970.
- [4] Maultzsch, M.; Roos, W.: Erstarrungsmessungen an Zementpasten. In: Jahresbericht 1976 der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin. Berlin 1977.

Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung

Von WA Dipl.-Ing. Ernst Limberger, ORR Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

DK 693.55.02 : 620.178.7

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr.3 S. 149/152

Manuskript-Eingang 15. April 1977

Inhaltsangabe

Einleitend wird dargelegt, daß die z. Z. verfügbaren Unterlagen über das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen unter stoßartiger Belastung nicht ausreichen, die dynamische Grenztragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zutreffend zu beschreiben.

Anschließend werden die Planung von Versuchen sowie Ergebnisse aus Vorversuchen dargestellt, bei denen die Stoßbelastung der Stahlbetonbalken mit einer servohydraulischen Anlage geregelt erzeugt wird.

Stahlbeton – Grenztragfähigkeit bei Stoßbelastung – Servohydraulische Stoßeinrichtung

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines
70. Lebensjahres gewidmet

1. Einführung

Stahlbetonkonstruktionen haben sich seit langer Zeit als Schutzbauten bewährt. Sie werden im baulichen Katastrophenschutz ebenso eingesetzt wie zum Schutz der Umwelt vor schädigenden Einflüssen aus Anlagen mit großem Gefahrenpotential. Hierzu gehören auch kerntechnische Anlagen, die durch Stahlbeton-Sicherheitshüllen eingeschlossen werden. Sie schützen die Anlage vor Einwirkungen von außen (z. B. abstürzende Flugzeuge, Druckwellen von Explosionen). Sie schützen aber ebenso die Umwelt vor Radioaktivität, deren Freisetzung im Inneren der Sicherheitshülle bei bestimmten Störfällen postuliert wird.

Der Entwurf und die Auslegung von Stahlbetonkonstruktionen gegen dynamisch einwirkende Belastungen bedingen ausreichende Kenntnisse über das mechanische Verhalten von Stahlbetonbauteilen bis zu deren endgültigem Versagen (Grenztragfähigkeit). Während die rechnerische Analyse – bei bekanntem Werkstoffverhalten – keine prinzipiellen Schwierigkeiten mehr bereitet, seitdem die numerischen Rechenverfahren eine stürmische Entwicklung genommen haben (siehe z. B. [1], [2]), sind die Kenntnisse über das Werkstoffverhalten bei großen Verformungsgeschwindigkeiten kaum gewachsen.

Die in der Regel getroffene Annahme, daß die statischen, aus Versuchen bekannten Werkstoffgesetze und deren Kenndaten auch bei großen Verformungsgeschwindigkeiten gelten, ist nicht ohne genauere Untersuchungen haltbar. Die bisher bekannten Versuche deuten in verschiedenen Fällen auf Unterschiede bei statischer und dynamischer Beanspruchung hin. Über diese Fragen ist in dem Übersichtsartikel [3] ausführlich referiert worden, speziell über Versuchsergebnisse an Stahlbeton- bzw. an Spannbetonbauteilen in [4]. Bei dem Vergleich der Energieabsorption bei statischer und bei dynamischer Beanspruchung ist allerdings nach [4] eine Änderung der Last-Verformungs-Kurve (Momenten-Krümmungs-Beziehung) ausdrücklich außer Betracht geblieben. Ebenso ist angenommen worden, daß der Versagensmechanismus unverändert bleibt, obwohl die Beobachtung dem in zahlreichen Fällen widerspricht [5]. Die Art und Weise, den

Impuls auf die Probekörper aufzubringen, ist bei den verschiedenen Versuchsreihen unterschiedlich gewesen. Zuverlässige Daten über die Impulsform liegen nur für wenige Versuchsreihen vor.

Zusammengefaßt erlauben die bisher veröffentlichten Untersuchungen den Schluß, daß die maximale Stoßkraft größer ist als die statisch maximal erreichte Last und daß die aufgetretenen Bruchverformungen bei dynamischer Beanspruchung größer sind als bei statischer Belastung. Das Energieaufnahmevermögen des Bauteils nimmt bei dynamischer Belastung zu, wenn nicht frühzeitiges Scherversagen bei sehr kurzen Stößen und geringer Schubbewehrung zu wesentlich unterschiedlichen Versagensmechanismen führt.

Die theoretische Deutung von Versuchsergebnissen wird erschwert, wenn die gebräuchlichen technischen Näherungen benutzt werden, wie das für Flächentragwerke und Balken in der Regel geschieht (Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte, Kirchhoff'sche Plattentheorie) und Stahlbeton als quasihomogener, nicht notwendigerweise isotroper „Werkstoff“ charakterisiert wird durch eine Relation zwischen Krümmung der Balkenachse bzw. der Flächenmittelebene und den Biegemomenten im gleichen Punkt (Nahwirkungshypothese). Die damit verbundene integrale Beschreibung von gerissenen Zugzonen im Beton verlangt bei der Interpretation von Versuchen den Verzicht auf die Berücksichtigung bestimmter Phänomene, die der Inhomogenität zuzuordnen sind, wie das Auftreten einzelner Risse, durch das auch die Meßergebnisse – z. B. für die Beschleunigungen – am Bauteil beeinflußt werden.

2. Problembeschreibung

Das Verformungsverhalten eines Stahlbetonbauteiles kann durch die in *Bild 1* wiedergegebene Kurve charakterisiert werden. Solange der Beton in der Zugzone des biegebeanspruchten Bauteiles nicht gerissen ist (sog. Zustand I), verhält sich das Bauteil sehr steif. In den höchstbeanspruchten Bereichen treten sodann Risse im Beton auf (Zustand II), deren Verteilung und Aufweitung durch die Art der Bewehrung und die Güte des Verbundes bestimmt wird. Mit zunehmender Belastung beginnen die Bewehrungsstäbe zu fließen (Zustand III), und die Risse im hochbeanspruchten Bereich weiten sich irreversibel auf. Das Bauteil versagt,

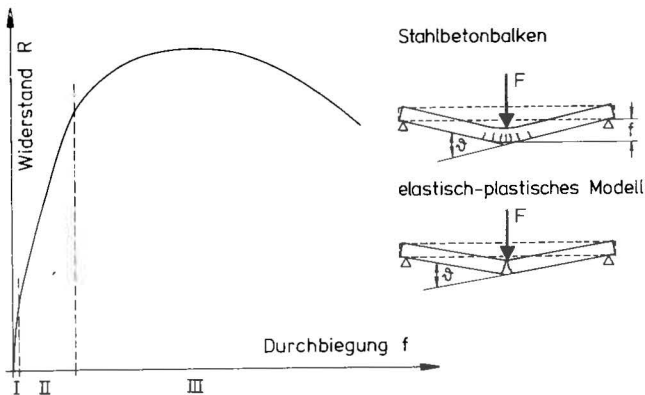


Bild 1
 Verformungsverhalten eines Stahlbetonbalkens unter mittlerer Einzellast bei verformungsgeregeltem Versuch.
 Bei langsamer Verformung sind Probenwiderstand R und Belastung F identisch

wenn entweder die Bewehrungsstähe reißen oder der Beton in der Druckzone versagt.

Die erheblichen Unsicherheiten, die bei der Bestimmung des Energieaufnahmevermögens auftreten, sind offensichtlich nur durch systematische experimentelle Untersuchungen zu beseitigen, da grundlegende Ansätze über das mechanische Verhalten von Stahlbetonbauteilen bei großen Verformungsgeschwindigkeiten überprüft werden müssen.

Die Hoffnung, das Verhalten komplex reagierender Verbundbauteile allein durch die Untersuchung des Verhaltens der einzelnen Komponenten (hier: Beton, Stahl, Verbund) zutreffend beschreiben zu können, dürfte in absehbarer Zukunft noch nicht zu anwendungsreifen Ergebnissen führen und verlangte selbst dann noch nach einer experimentellen Bestätigung.

Ziel der im folgenden beschriebenen Untersuchungen war es, die Planung von Versuchen zum Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung zu umreißen und in Vorversuchen deren versuchstechnische Durchführbarkeit zu erproben.

Aktueller Anlaß dafür, das beschriebene Problem vorrangig zu untersuchen, sind die Schwierigkeiten, die bei der Beurteilung des Verhaltens von Stahlbeton-Sicherheitsbehältern von Kernkraftwerken beim als Lastfall angenommenen Aufprall eines abstürzenden Flugzeuges aufgetreten sind.

3. Planung von Versuchen

3.1. Versuchsziel

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2 soll es das zukünftige Versuchsziel sein, Unterlagen für die Beurteilung der Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen bei stoßartiger Belastung, speziell bei Flugzeugabsturz, zu schaffen. Da derartige Tragwerke jedoch wegen der erforderlichen Abmessungen im allgemeinen der Versuchstechnik nicht zugänglich sind, werden Versuche in kleinerem Maßstab notwendig. Der Einfluß der Querschnittshöhe muß hierbei extrapoliert werden. Als Ergebnis der Versuche werden querschnittsbezogene Momenten-Krümmungs-Beziehungen (integrales Werkstoffgesetz) bzw. maximale plastische Drehwinkel als Funktion der Beanspruchungsgeschwindigkeit ange-

geben. Der Versuchsparameter Beanspruchungsgeschwindigkeit wird in dem im folgenden beschriebenen Übertragungsmodell definiert.

3.2. Übertragungsmodell

Maßgebend für die Grenztragfähigkeit eines Bauteils sind die möglichen plastischen Dehnungen, die sich in begrenzten Zonen konzentrieren, z. B. bei Biegeträgern unter Einzellast im plastischen Gelenk, bei Flächentragwerken unter Einzellast entlang der Gelenklinien. Von den verschiedenen Modellparametern ist die Drehwinkelgeschwindigkeit im plastischen Gelenk eine geeignete Übertragsgröße. Die Dehnungen der verschiedenen Balkenfasern im plastischen Bereich sind über die Querschnittshöhe mit dem Drehwinkel gekoppelt. Mit zunehmender Querschnittshöhe wächst der Hebelarm der einzelnen Fasern, in gleichem Maße vergrößert sich aber auch die Größe des plastischen Bereichs. Daher kann man davon ausgehen, daß bei gleicher mittlerer Drehwinkelgeschwindigkeit im plastischen Gelenk näherungsweise unabhängig von der Querschnittshöhe gleiche mittlere Dehnungsgeschwindigkeiten z. B. in den Randfasern auftreten. Demnach sind im Versuch plastische Drehwinkel derart zu erzeugen, daß die auftretenden Drehwinkelgeschwindigkeiten denen am wirklichen Bauteil unter Stoßbelastung entsprechen. Außerdem wird zu untersuchen sein, inwieweit die Form des Stoßkraft-Zeit-Verlaufs die Versuchsergebnisse beeinflusst.

Eine Abschätzung für die Größenordnung des Parameters Drehwinkelgeschwindigkeit ist in *Bild 2* dargestellt. Als Bauteil ist die Sicherheitshülle eines Kernkraftwerkes betrachtet worden. Die Kugelschale von 1,20 m Dicke wird durch

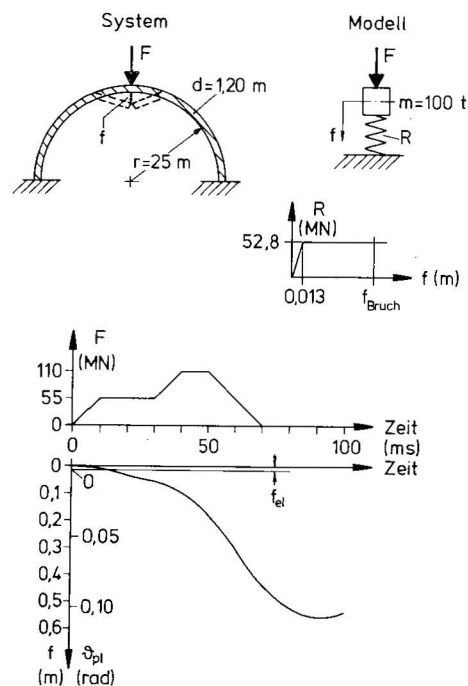


Bild 2
 Näherungslösung für die Verformungen einer Kugelschale infolge Flugzeugabsturzes.

ϑ_{pl} : plastischer Drehwinkel ϑ

einen Stoßkraft-Zeit-Verlauf belastet, der sich infolge des Aufpralls eines schnellfliegenden Militärflugzeuges ergibt (Typ Phantom, $v = 215$ m/s; vgl. [6]). Die Abschätzung der Tragfähigkeit wird mit Hilfe der Bruchlinientheorie vorgenommen. Wenn man die Fließlinienfigur und den Bruch-

kreishalbmesser entsprechend [7] ansetzt, können die Verformungen der Schale mit Hilfe eines Masse-Feder-Modells abgeschätzt werden. Für das dargestellte Beispiel ergeben sich hierbei maximale Drehwinkel von 0,11 rad in ca. 90 ms. Der Bezugsparameter für Versuche ist somit eine mittlere Drehwinkelgeschwindigkeit von ca. 1,2 rad/s, die durch eine Stoßbelastung zu erzeugen ist.

4. Versuche an Biegeträgern aus Stahlbeton

Die im folgenden beschriebenen Versuche waren im wesentlichen dem Problem der Durchführbarkeit der Stoßversuche im interessierenden Parameterbereich unter Verwendung von servohydraulischen Anlagen gewidmet.

4.1. Versuchseinrichtung

Der Versuchsaufbau besteht aus einem servohydraulischen Prüfzylinder, einem Kraftrahmen sowie dem Probekörper (Bild 3). In Vorversuchen zeigte es sich, daß es aus physika-

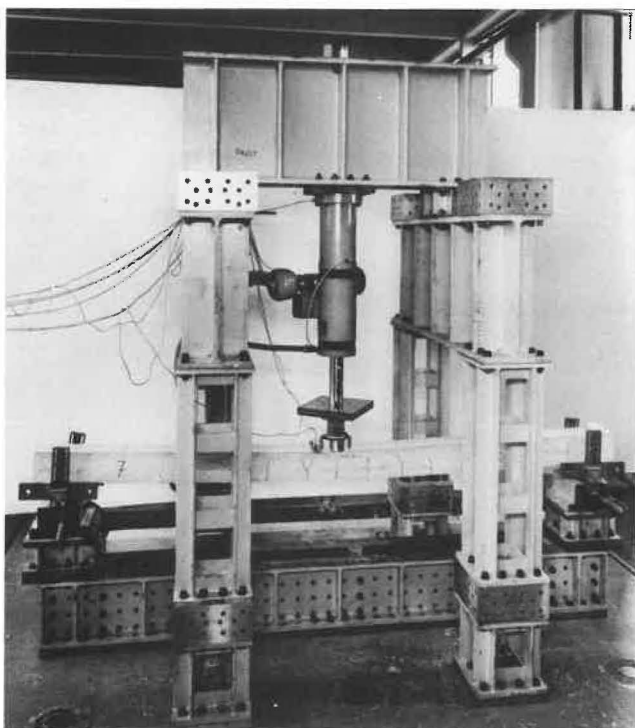


Bild 3 Versuchseinrichtung für Stoßbelastungen von Stahlbetonbalken

lischen Gründen nicht möglich ist, den geplanten Stoßkraft-Zeit-Verlauf im geschlossenen Regelkreis kraftgeregelt aufzubringen. Die notwendige Stoßbelastung wird daher durch Vorgabe einer Weg-Zeit-Funktion gesteuert, die unter Abschätzung des Probekörperverhaltens mit Hilfe eines mechanischen Modells berechnet werden muß. Für die vorliegenden Versuche wird ein Masse-Feder-Modell mit nichtlinearer Federkennlinie für die Ermittlung der Sollwertvorgabe verwendet, vgl. Bild 4. Bei Berücksichtigung der Leistungsdaten des vorhandenen Prüfzylinders (max F = 25 kN, Servoventil 2 x 57 l/min) ergaben sich folgende Probekörperabmessungen:

- Stützweite: 2,72 m
- Querschnitt: 15 cm · 15 cm
- Bewehrung: BSt 42/50 RK,
oben 2 φ 8 mm,
unten 2 φ 10 mm

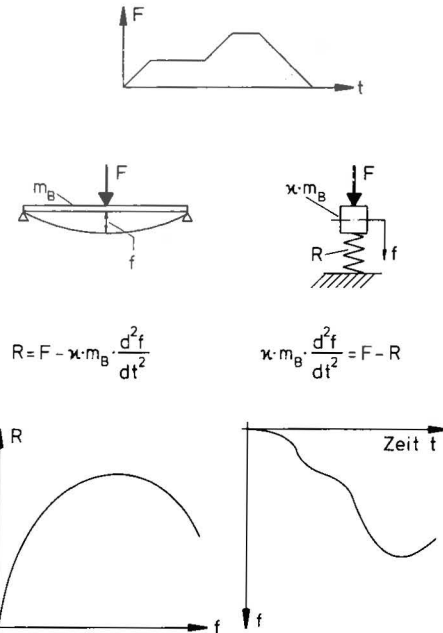


Bild 4 Abbildung eines Stahlbetonbalkens auf ein Masse-Feder-Modell mit nichtlinearer Federkennlinie. m_B = Balkenmasse; $\eta = 0,33 \div 0,5$

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird wiederum ein Masse-Feder-Modell verwendet. Als Meßgrößen sind hierfür neben der Stoßkraft der Weg und die Beschleunigung des Probekörpers in Feldmitte notwendig. Die Meßsignale wurden mit einem Transientenrecorder registriert (vier Kanäle, Abtastfrequenz 5 KHz je Kanal) und nach dem Versuchende mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet.

4.2. Versuchsergebnisse

Es wurden bisher sieben Versuche an Betonbalken mit stoß-

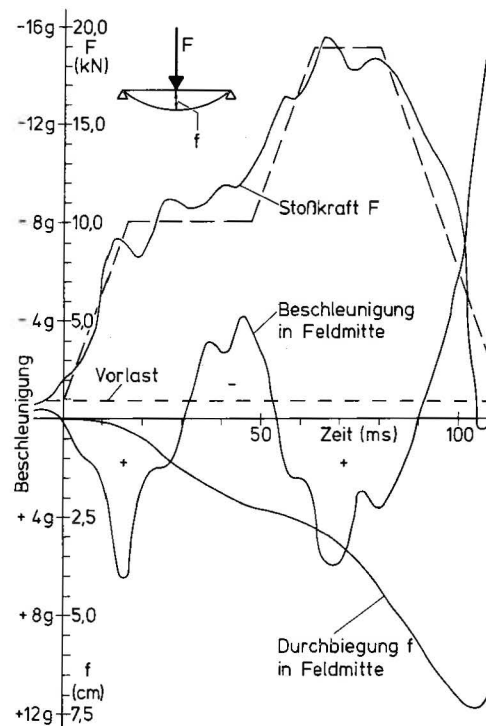


Bild 5 Stoßbelastung von Stahlbetonbalken, typisches Versuchsergebnis (Balken 12)

artig aufgebrachter Belastung durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, daß es versuchstechnisch möglich ist, den vorgegebenen Stoßkraft-Zeit-Verlauf nachzufahren. Die erreichte mittlere Drehwinkelgeschwindigkeit des Balkens betrug $\sim 1,5$ rad/s und liegt im angestrebten Parameterbereich. Damit ist das zu Beginn der Versuchsreihe gesteckte Ziel erreicht worden.

Zum Vergleich wurden zwei Balken mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit $v = df/dt$ von 1,0 mm/s (zügig) und zwei Balken mit 0,1 mm/s (statisch) weggeregelt bis zum Bruch beansprucht.

Die mittlere Verformungsgeschwindigkeit $\bar{v} = f_{\max}/t_{f \max}$ ($t_{f \max}$ = Zeitpunkt bei Erreichen der größten Verformung f_{\max}) bei Versuchen mit stoßartiger Belastung betrug ~ 1000 mm/s. Bild 5 zeigt einen typischen Verlauf der im Versuch aufgezeichneten Meßwerte. Gestrichelt eingezeichnet ist der angestrebte Stoßkraftverlauf mit einer Stoßzeit von $t_s = 105$ ms. Die Anpassung des Stoßkraft-Ist-Verlaufs an den gestrichelt gezeichneten idealisierten Stoßkraft-Soll-Verlauf wurde bei den ersten Versuchen noch nicht ausreichend optimiert und kann in weiteren Versuchen verbessert werden.

4.3. Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Widerstand-Verformungs-Kurven der Balken 9 und 20 (zügige Beanspruchung) sowie der Balken 18 und 19 (statische Beanspruchung) wurden während des Versuchs direkt aufgezeichnet, da dynamische Effekte nicht zu berücksichtigen waren. Die Widerstand-Verformungs-Kurven der stoßartig belasteten Balken 15 und 16 wurden aus den aufgezeichneten Meßwerten unter Verwendung des in Bild 4 dargestellten mechanischen Modells errechnet. Als mitschwingende Masse wurde bis zum Bruch die halbe Balkenmasse angenommen ($\eta = 0,5$). Die Balken 15 und 16 waren am Ende des Stoßes kurz vor dem Bruch. Die Betondruckzone war bereits zerstört, und bei Balken 15 war einer der unteren Bewehrungsstähle gerissen. Ein Vergleich der Widerstand-Verformungs-Kurven bei statischer, zügiger und stoßartiger Belastung zeigt deutlich die Abhängigkeit der maximalen Mittendurchbiegung von der mittleren Verformungsgeschwindigkeit. Das Energieaufnahmevermögen des Stahlbetonbalkens nimmt mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit deutlich zu (Bild 6). Inwieweit dynamische Effekte und z. B. eine gegenüber dem statischen Fall veränderte zeit- und geschwindigkeitsabhängige Momenten-Krümmungs-Beziehung die Größe der Energieaufnahmekapazität beeinflussen, kann aufgrund der geringen Zahl der Meßstellen bei den Vorversuchen bisher noch nicht einigermaßen zutreffend abgeschätzt werden.

5. Zusammenfassung, Ausblick

Eine servohydraulische Stoßeinrichtung ist geeignet, Stahlbetonbalken stoßartig bis zu deren endgültigem Versagen zu belasten, wobei ein vorgegebener Stoßkraft-Zeit-Verlauf angenähert werden kann. Zu diesem Ergebnis haben Versuche an Stahlbetonbalken mit einer relativ leistungsschwachen servohydraulischen Versuchseinrichtung geführt. Darüber hinaus konnten in diesen Versuchen, die im wesentlichen dem Problem der versuchstechnischen Durchführbarkeit gewidmet waren, erste Ansätze zur Klärung der Frage überprüft werden, inwieweit sich das Werkstoffverhalten bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten verändert.

In weiteren Versuchen, die regeltechnisch besser optimiert

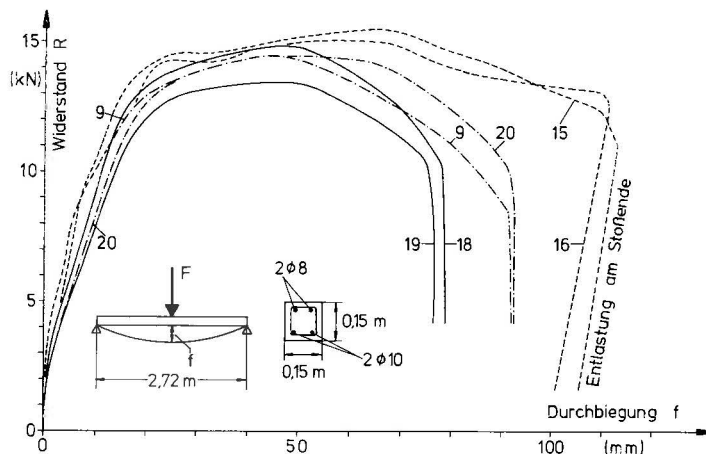


Bild 6

Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf Tragverhalten und Grenztragfähigkeit von Biegeträgern aus Stahlbeton.

*Verformungsgeschwindigkeit: Vers. 18,19: 10^{-1} mm/s
Vers. 9/20: 10^0 mm/s
Vers. 15/16: 10^3 mm/s*

Betongüte: $\beta_w = 50 \div 60$ MN/m²

Bewehrung: BSt 42/50 RK, Bügel BSt 22/34 GU

sein sollen und bei denen erheblich mehr mechanische Größen während der Versuche gemessen werden, wird in nächster Zeit der Frage nachgegangen werden, welche Werkstoffgesetze für Stahlbetonbauteile bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten angewendet werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Belytschko, T.:
A survey of numerical methods and computer programs for dynamic structural analysis.
Nucl. Eng. Des. 37 (1976), No. 1, S. 23 – 34
- [2] Stangenberg, F.:
Berechnung von Stahlbetonbauteilen für dynamische Beanspruchungen bis zur Tragfähigkeitsgrenze.
KIB-Berichte Heft 16, Vulkan-Verlag Essen (1973)
- [3] RILEM-Report:
The effect of impact loading on building 21-IL RILEM Committee report.
Matériaux et constructions, Vol. 8 (1974), No. 44
- [4] Skov, K., u. S. O. Olesen:
Impact resistance of reinforced and prestressed concrete members.
21-IL RILEM Committee report.
Matériaux et constructions, Vol. 8 (1974), No. 44
- [5] Kavyrchine, M., u. W. Struck:
Practical application to testing, design and research.
21-IL RILEM report.
Matériaux et constructions, Vol. 8 (1974), No. 44
- [6] Dritler, K., u. G. Gruner:
The force resulting from impact of fast-flying military aircraft upon a rigid wall.
Nucl. Eng. Des. 37 (1976), No. 2, S. 245 – 248
- [7] Struck, W., E. Limberger u. H. Eifler:
Probleme und Kenntnislücken bei der Beurteilung des Widerstandes von Stahlbetonbauteilen gegenüber stoßartiger Belastung.
Preprints 2. Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT), 1973, Vol. 4, Beitrag J 3/4

Eine Sonde zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität von Baustoffen in situ

Von **RegDir. Dr.-Ing. Armin Wagner**, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

DK 699.86.058 : 536.2.022/

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr.3 S. 153/157

Manuskript-Eingang 5. Mai 1977

Inhaltsangabe

Es wird eine Sonde beschrieben, mit deren Hilfe gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität nichtmetallischer Baustoffe bestimmt werden kann. Bei der theoretischen Behandlung werden die auftretenden Differentialgleichungen durch Laplace-Transformation gelöst. Die mathematischen Schwierigkeiten der inversen Transformation werden durch iterative Lösung der Gleichungen im Bildraum umgangen, wobei ein Rechner eingesetzt wird. Es wurden 14 verschiedene Baustoffe untersucht; die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit entsprechenden Literaturangaben.

Versuchsdurchführung – Meßergebnisse – Baustoffe – Wärmeleitfähigkeit – Temperaturleitfähigkeit – spez. Wärmekapazität

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines 70. Lebensjahres gewidmet

Indizes

- 1 Stoffbereich 1: Metall (Heizquelle)
- 2 Stoffbereich 2: Kunststoffmantel (Acrylglas) der Sonde
- 3 Stoffbereich 3: untersuchter Stoff

Ausnahme: Die Kennzeichnung für die Abstände der beiden im Stoffbereich 2 befindlichen Temperaturfühler r_1 und r_2

Verwendete Symbole

Formelzeichen	Benennung	Einheit
t	Zeit	s
θ	Temperatur bzw. Temperaturerhöhung	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{K m})$
c	spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
ρ	Dichte	kg/m^3
a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
r	Abstand Heizquellenachse/ Temperaturmeßstelle	m
b	Radius der Heizquelle	m
Q_0	längenbezogene Heizleistung	W/m
A_0	volumenbezogene Heizleistung	W/m^3
$\frac{1}{\alpha_k}$	Kontaktwiderstand	$\text{K m}^2/\text{W}$
p	Transformationsparameter	s^{-1}
$\bar{\theta}(p) = \int_0^{\infty} \theta(t) e^{-pt} dt$	Laplace-Transformierte von $\theta(t)$	$\text{K} \cdot \text{s}$
$q = \left(\frac{p}{a}\right)^{1/2}$	—	m^{-1}
$C = \frac{A_0}{\lambda p q^2}$	—	$\text{K} \cdot \text{s}$
A, B	Integrationskonstanten	$\text{K} \cdot \text{s}$
I_0, I_1	modifizierte Besselfunktion 0. bzw. 1. Ordnung	
K_0, K_1	modifizierte Hankelfunktion 0. bzw. 1. Ordnung	

1. Einleitung

Experimentell gesicherte Aussagen über den Wärmeschutz eines ausgeführten Gebäudes zu gewinnen, bedeutet häufig die Notwendigkeit der Durchführung von Messungen am Gebäude selbst. Die dabei angewandten Verfahren laufen auf die Bestimmung des Wärmestromes, der durch das untersuchte Bauteil fließt, hinaus. Dabei bleiben die nichtstationären Randbedingungen theoretisch unberücksichtigt. Um diese vereinfachende Annahme in ihrer Auswirkung wenigstens teilweise zu kompensieren, sind mindestens mehrtägige Messungen erforderlich, die zudem nur den Wärmedurchlaßwiderstand bzw. die Wärmeleitfähigkeit ergeben. Das wärmeschutztechnische Verhalten einer Baukonstruktion bei dynamischen Randbedingungen kann jedoch mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit λ allein nicht beschrieben werden, vielmehr bedarf es u. a. der Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit a bzw. der volumenbezogenen Wärmekapazität $\rho \cdot c$.

Die in der Literatur beschriebenen Sonden basieren auf der einfachen Theorie des gestreckten Heizdrahtes. Sie weisen große Meßunsicherheiten auf und gestatten zudem nur die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [1, 2, 3, 4]. Im folgenden werden der Aufbau und die theoretische Behandlung einer Sonde beschrieben, mit deren Hilfe alle drei Stoffkennwerte λ , a und $\rho \cdot c$ in situ bestimmt werden können.

2. Aufbau der Sonde

Die Sonde besteht im wesentlichen aus einem vollen Acrylglaszylinder von 18 mm ϕ und 240 mm Länge, in dessen Achse ein Heizelement verläuft (s. Bild 1). Dieses Heizelement setzt sich aus einem Rohr (Wanddicke 0,69 mm, Au-

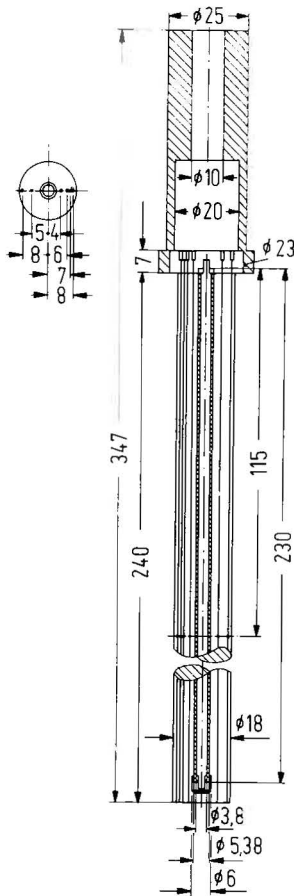


Bild 1
Sonde zur Bestimmung von λ , a und $\rho \cdot c$, schematische Darstellung

ßendurchmesser 5,38 mm) aus hochlegiertem, korrosionsbeständigem Stahl, in das koaxial ein Vollzylinder (3,8 ϕ mm) aus dem gleichen Stahl eingeführt wurde, zusammen. Die zentrische Führung von Rohr und Zylinder erfolgt durch zwei entsprechend ausgeführte Endstücke. Obwohl dadurch kein Kontakt zwischen Rohr und Stab besteht, die Hin- und Rückleitung des Heizstromes übernehmen, wurden beide Teile, auch um eine möglichst homogene Temperaturverteilung über den Zylinderquerschnitt bei der Beheizung zu erhalten, durch eine Lackschicht miteinander verbunden und elektrisch isoliert. Die wirksamen Querschnitte von Rohr und Stab waren so gewählt worden, daß sie annähernd denselben elektrischen Widerstand besaßen und somit auch dadurch eine möglichst homogene Erwärmung der Heizquelle gewährleistet wurde. Als Temperaturfühler dienten Thermoelemente, die im Acrylglaszylinder eingegossen, parallel zum Heizelement und damit in Isothermen verlaufen. Weitere Einzelheiten, insbesondere zur Herstellung der Sonde, finden sich in [5].

3. Theorie der Sonde

Ausgangsgleichung ist die Fourier' Wärmeleitungsgleichung

$$\Delta\theta - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta}{\partial t} = 0 \quad (3.1.)$$

Entsprechend den drei Stoffbereichen Heizelement, Acrylglas, zu untersuchendes Medium (mit den Indizes 1, 2, 3) beschreiben drei Gleichungen die Wärmeleitungsvorgänge:

$$\text{Bereich 1 } \frac{\partial^2\theta_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\theta_1}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_1}{\partial t} = -\frac{A_0}{\lambda} \quad (3.2.)$$

$$\text{Bereich 2 } \frac{\partial^2\theta_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\theta_2}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_2}{\partial t} = 0 \quad (3.3.)$$

$$\text{Bereich 3 } \frac{\partial^2\theta_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\theta_3}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_3}{\partial t} = 0 \quad (3.4.)$$

Diese Gleichungen ergeben sich aus (3.1.) beim Übergang zu Zylinderkoordinaten unter der Voraussetzung, daß die Längsachse der Sonde in der Zylinderachse verläuft. Die inhomogene Form von (3.2.) berücksichtigt die Wirkung des Heizelementes als Wärmequelle.

Mit Hilfe der Laplace-Transformation lassen sich die Gl. (3.2.), (3.3.), (3.4.) in die gewöhnlichen Differentialgleichungen überführen

$$\frac{d^2\bar{\theta}_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{\theta}_1}{dr} - q_1^2 \bar{\theta}_1 = -\frac{A_0}{\lambda_1 p} \quad (3.5.)$$

$$0 \leq r \leq b_1$$

$$\frac{d^2\bar{\theta}_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{\theta}_2}{dr} - q_2^2 \bar{\theta}_2 = 0 \quad (3.6.)$$

$$b_1 \leq r \leq b_2$$

$$\frac{d^2\bar{\theta}_3}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{\theta}_3}{dr} - q_3^2 \bar{\theta}_3 = 0 \quad (3.7.)$$

$$b_2 \leq r < \infty$$

deren allgemeine Lösungen bekannt sind:

$$\bar{\theta}_1 = C + A_1 I_0(q_1 r) + B_1 K_0(q_1 r) \quad (3.8.)$$

$$\bar{\theta}_2 = A_2 I_0(q_2 r) + B_2 K_0(q_2 r) \quad (3.9.)$$

$$\bar{\theta}_3 = A_3 I_0(q_3 r) + B_3 K_0(q_3 r) \quad (3.10.)$$

Da

$\bar{\theta}_1(r)$ endlich bleiben muß für $r = 0$, folgt $B_1 = 0$, da $K_0(0)$ über alle Grenzen wächst

$\bar{\theta}_3(r)$ beschränkt sein muß für $r = \infty$, muß $A_3 = 0$ werden, da $I_0(\infty)$ über alle Grenzen wächst.

Damit erhält man

$$\bar{\theta}_1 = C + A_1 I_0(q_1 r) \quad (3.11.)$$

$$\bar{\theta}_2 = A_2 I_0(q_2 r) + B_2 K_0(q_2 r) \quad (3.12.)$$

$$\bar{\theta}_3 = B_3 K_0(q_3 r) \quad (3.13.)$$

Die in den Gleichungen auftretenden Konstanten werden unter Ausnutzung der Randbedingungen

$$\lambda_1 \frac{d\bar{\theta}_1}{dr} = \lambda_2 \frac{d\bar{\theta}_2}{dr} \quad (3.14.)$$

$$-\lambda_1 \frac{d\bar{\theta}_1}{dr} = \alpha_{k_1} (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2) \quad (3.15.)$$

$$\lambda_2 \frac{d\bar{\theta}_2}{dr} = \lambda_3 \frac{d\bar{\theta}_3}{dr} \quad (3.16.)$$

$$-\lambda_2 \frac{d\bar{\theta}_2}{dr} = \alpha_{k_2} (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_3) \quad (3.17.)$$

berechnet. Im vorliegenden Fall ist die Berechnung der in (3.12.) auftretenden Konstanten A_2 und B_2 notwendig, da im Bereich 2 (Acrylglaszylinder) $\theta_2 = f(r, t)$ gemessen wird.

Man erhält das lineare Gleichungssystem

$$a_{11} A_1 - a_{12} A_2 + a_{13} B_2 = 0 \quad (3.18.)$$

$$-a_{21} A_1 + a_{22} A_2 + a_{23} B_2 = C \quad (3.19.)$$

$$a_{32} A_2 - a_{33} B_2 + a_{34} B_3 = 0 \quad (3.20.)$$

$$-a_{42} A_2 + a_{43} B_2 + a_{44} B_3 = 0 \quad (3.21.)$$

mit

$$a_{11} = \lambda_1 q_1 I_1 (q_1 b_1) \quad (3.22.)$$

$$a_{12} = \lambda_2 q_2 I_1 (q_2 b_1) \quad (3.23.)$$

$$a_{13} = \lambda_2 q_2 K_1 (q_2 b_1) \quad (3.24.)$$

$$a_{21} = \lambda_1 / \alpha_{K_1} q_1 I_1 (q_1 b_1) + I_0 (q_1 b_1) \quad (3.25.)$$

$$a_{22} = I_0 (q_2 b_1) \quad (3.26.)$$

$$a_{23} = K_0 (q_2 b_1) \quad (3.27.)$$

$$a_{32} = \lambda_2 q_2 I_1 (q_2 b_2) \quad (3.28.)$$

$$a_{33} = \lambda_2 q_2 K_1 (q_2 b_2) \quad (3.29.)$$

$$a_{34} = \lambda_3 q_3 K_1 (q_3 b_2) \quad (3.30.)$$

$$a_{42} = \lambda_2 / \alpha_{K_1} q_2 I_1 (q_2 b_2) + I_0 (q_2 b_2) \quad (3.31.)$$

$$a_{43} = \lambda_2 / \alpha_{K_2} q_2 K_1 (q_2 b_2) - K_0 (q_2 b_2) \quad (3.32.)$$

$$a_{44} = K_0 (q_3 b_2) \quad (3.33.)$$

Für die gesuchten Konstanten ergibt sich

$$A_2 = \frac{D_2}{D}, \quad B_2 = \frac{D_3}{D} \quad (3.34.) \quad (3.35.)$$

mit

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & -a_{12} & a_{13} & 0 \\ -a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & -a_{33} & a_{34} \\ 0 & -a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} \quad (3.36.)$$

und

$$D_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 \\ -a_{21} & C & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} \quad (3.37.)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & -a_{12} & 0 & 0 \\ -a_{21} & a_{22} & C & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} \\ 0 & -a_{42} & 0 & a_{44} \end{vmatrix} \quad (3.38.)$$

Damit erhält man als Lösung von (3.6.)

$$\bar{\theta}_2 = \frac{1}{D} \{ D_2 I_0 (q_2 r) + D_3 K_0 (q_2 r) \} \quad (3.39.)$$

Aus (3.39.) folgt die Beziehung

$$\frac{a_{34}}{a_{44}} = \frac{D_{E_4} I_0 (q_2 r) + D_{E_6} K_0 (q_2 r) - D_{E_2} \bar{\theta}_2}{D_{E_3} I_0 (q_2 r) + D_{E_5} K_0 (q_2 r) - D_{E_1} \bar{\theta}_2} \quad (3.40.)$$

$$D_{E_1} = a_{42} \{ a_{11} a_{23} + a_{13} a_{21} \} + a_{43} \{ a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21} \} \quad (3.41.)$$

$$D_{E_2} = -a_{32} \{ a_{11} a_{23} + a_{13} a_{21} \} + a_{33} \{ a_{12} a_{21} - a_{11} a_{22} \} \quad (3.42.)$$

$$D_{E_3} = C a_{11} a_{43} \quad D_{E_4} = -C a_{11} a_{33} \quad (3.43.) \quad (3.44.)$$

$$D_{E_5} = C a_{11} a_{42} \quad D_{E_6} = -C a_{11} a_{32} \quad (3.45.) \quad (3.46.)$$

Die rechte Seite von (3.40.) ist aus der Messung bekannt. Aus (3.30.) und (3.33.) folgt

$$\frac{a_{34}}{a_{44}} = \lambda_3 q_3 \frac{K_1 (q_3 b_2)}{K_0 (q_3 b_2)} \quad (3.47.)$$

Es besteht jetzt die Aufgabe, die in (3.47.) gemeinsam auftretenden Stoffkennwerte λ_3 und a_3 zu trennen. Dazu wird (3.47.) mit (3.40.) kombiniert und λ_3 als Funktion von a_3 tabelliert. Der für Baustoffe in Frage kommende Temperaturleitfähigkeitsbereich umfaßt nur eine Größenordnung: 10^{-7} bis 10^{-6} m²/s. In Bild 2 ist das Ergebnis dieser Tabellierung

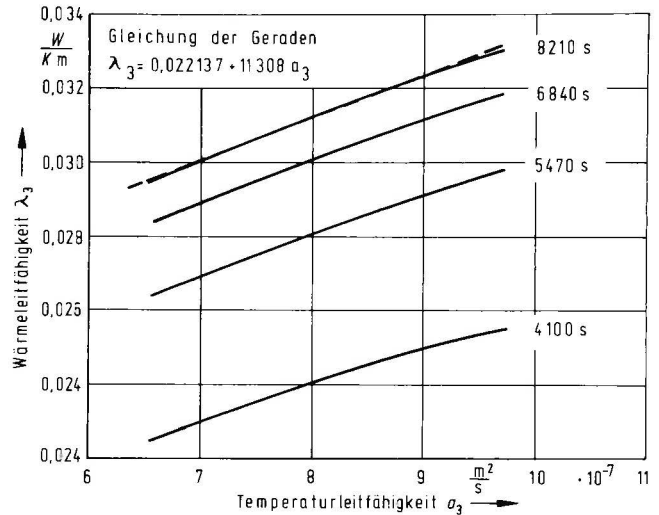


Bild 2
Linearisierung von $\lambda_3 = f(a_3)$ zur Bestimmung von $\partial \lambda_3 / \partial a_3$ am Beispiel extrudierten Polystyrolschaumkunststoffes

mit unterschiedlicher Versuchsdauer als Parameter dargestellt. Für die optimale Versuchsdauer von ca. 2 h ergibt sich ein Kurvenverlauf sehr geringer Krümmung, der gut durch eine nach Gauß berechnete Gerade angenähert werden kann:

$$\lambda_3 = c_0 + c_1 a_3 \quad (3.48.)$$

Differenziert man (3.47.) nach a_3 , erhält man nach längerer Zwischenrechnung

$$\frac{\partial \lambda_3}{\partial a_3} = (q_3 b_2)^2 \cdot \frac{a_{34}}{a_{44}} \left\{ 1 - \left[\frac{K_0 (q_3 b_2)}{K_1 (q_3 b_2)} \right]^2 \right\} \frac{1}{2 p b_2} \quad (3.49.)$$

Schreibt man (3.49.) so, daß auf der linken Seite die bekannten, auf der rechten Seite die unbekanntenen Ausdrücke stehen, ergibt sich

$$\frac{\partial \lambda_3}{\partial a_3} \cdot \frac{a_{44}}{a_{34}} \cdot 2 p b_2 = (q_3 b_2)^2 \left\{ 1 - \left[\frac{K_0 (q_3 b_2)}{K_1 (q_3 b_2)} \right]^2 \right\} \quad (3.50.)$$

wobei

$$\frac{\partial \lambda_3}{\partial a_3} = c_1 \quad \text{und} \quad \frac{a_{34}}{a_{44}}$$

nach (3.40.) aus der Messung bekannt sind. Die Gl. (3.50.) wird durch Iteration mit Hilfe eines Rechners gelöst, wobei man q_3 erhält. Damit ist das gesuchte

$$a_3 = \frac{p}{q_3^2} \quad (3.51.)$$

und mit (3.48.) ergibt sich für die Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_3 = c_0 + c_1 \frac{p}{q_3^2} \quad (3.52.)$$

Bei Anwendung der Laplace-Transformation muß der Transformationsparameter p vorgegeben werden. Dabei ergab sich, daß über p innerhalb des mathematisch zulässigen Bereiches nicht frei verfügt werden konnte. Die Meßergebnisse zeigten eine unerwartete Abhängigkeit von p . Wird p zu groß gewählt, konvergiert das Produkt $\theta(t) e^{-pt}$ zu schnell gegen Null, d. h. es kommt zu einem Informationsverlust, weil ein großer Teil der durch Messung ermittelten Funktion $\theta = f(t)$ praktisch keinen Einfluß mehr auf das Meßergebnis hat. Es war deshalb eine Auswahlvorschrift für p zu finden, die diesen Nachteil vermeidet und trotzdem das Laplace-Integral konvergieren läßt.

Dazu eignet sich (3.40.). Die rechte Seite dieser Gleichung enthält nur Kennwerte der Bereiche 1 oder 2, die sondenspezifisch und damit bekannt sind. Mißt man gleichzeitig $\theta = f(t)$ an zwei verschiedenen Stellen r_1 und r_2 , so muß theoretisch sein:

$$\frac{D_{E_4} I_0(q_2 r_1) + D_{E_6} K_0(q_2 r_1) - D_{E_2} (\bar{\theta}_2)_{r_1}}{D_{E_3} I_0(q_2 r_1) + D_{E_5} K_0(q_2 r_1) - D_{E_1} (\bar{\theta}_2)_{r_1}} - \frac{D_{E_4} I_0(q_2 r_2) + D_{E_6} K_0(q_2 r_2) - D_{E_2} (\bar{\theta}_2)_{r_2}}{D_{E_3} I_0(q_2 r_2) + D_{E_5} K_0(q_2 r_2) - D_{E_1} (\bar{\theta}_2)_{r_2}} = 0 \quad (3.53.)$$

Der Rechner löst (3.53.) durch Iteration, indem das p gesucht wird, für das (3.53.) Null oder ein Minimum wird. Anschaulich bedeutet diese Bestimmung von p , daß die Meßergebnisse nicht von den Abständen r_1 und r_2 abhängig sein dürfen, eine Forderung, die innerhalb der Meßunsicherheit erfüllt sein muß.

Eine Abschätzung, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, ergibt, daß die in den Randbedingungen (3.15.) und (3.17.) bzw. in (3.25.) und (3.31.) auftretenden Wärmeübergangskoeffizienten, die unbekannt sind, vernachlässigt werden können.

4. Meßapparatur

Die von den beiden Thermoelementen abgegebenen Spannungen werden einem zweikanaligen Linienschreiber zugeführt, der zur Kontrolle die beiden Meßkurven aufzeichnet. Gleichzeitig werden über zwei mit dem Schreiber gekoppelte Folgepotentiometer die Meßspannungen abgenommen und an eine Meßwerterfassungsanlage gelegt. Die Daten werden dabei mit einem schnellen Lochstreifenstanzer registriert (Bild 3).

5. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Messungen wurden an prismatischen oder kreiszylindrischen Probekörpern durchgeführt, die eine zentrische Bohrung zur Aufnahme der Sonde erhielten. Je nach dem untersuchten Material schwankten die verwendeten Heizströme zwischen 2,5 und 4 A. Dies entspricht bei einem längenbezogenen Widerstand des Heizelementes von $0,1364 \Omega/m$ einer längenbezogenen Leistung zwischen 0,85 und 2,18 W/m. Die Meßdauer lag in der Grö-

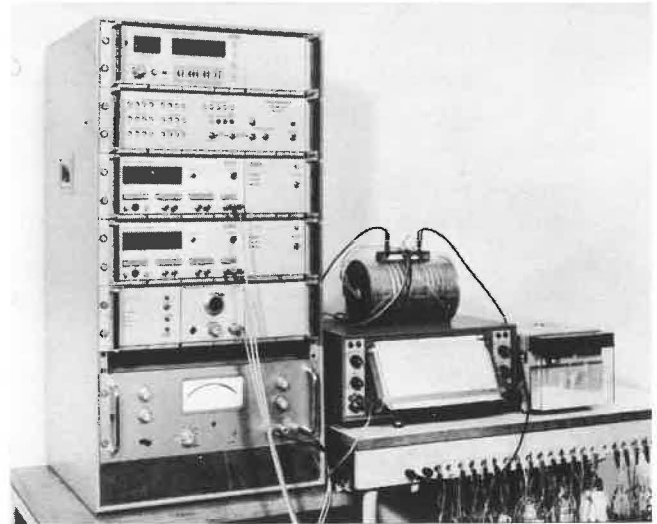


Bild 3
Linienschreiber mit Datenerfassungsanlage

ßenordnung von zwei Stunden, am Ende der Messungen ergaben sich je nach Heizstrom und Stoff maximale Temperaturerhöhungen von 2,7 bis 7 K. In Tabelle 1 sind die Versuchsergebnisse von 14 verschiedenen Baustoffen zusammengestellt und mit Literaturwerten verglichen. Es sind die Mittelwerte aus je zehn Einzelmessungen angegeben. Da von allen Versuchsstoffen die Rohdichten bestimmt wurden, konnte aus $\rho \cdot c$ die spezifische Wärmekapazität berechnet werden.

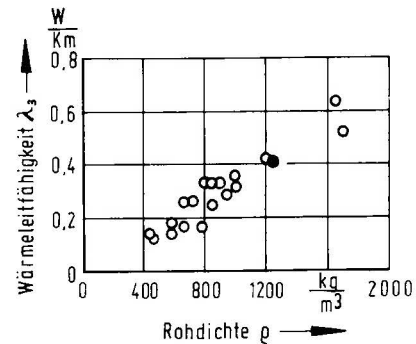


Bild 4
Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit λ_3 für Gips, in Bild 6 [6] eingetragen

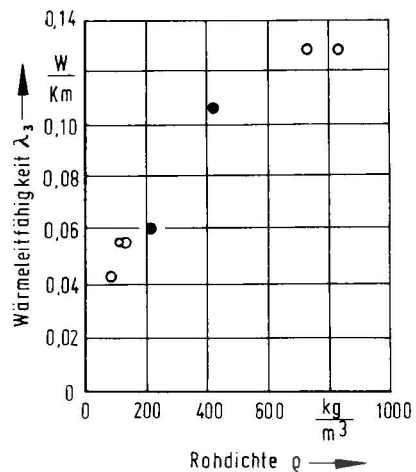


Bild 5
Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit λ_3 für Blähschiefer, in Bild 7 [6] eingetragen

Tabelle 1

Vergleich der Mittelwerte von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität (Sondenmessungen) mit den entsprechenden Literaturwerten

Stoff	Wärmeleitfähigkeit W/(K m)		Temperaturleitfähigkeit m ² /s		Spezifische Wärmekapazität kJ/(K kg)	
	Meßwert	Literaturwert	Meßwert	Literaturwert	Meßwert	Literaturwert
Bims	0,101	0,105 8)	1,74 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	0,942	0,753 bis 0,921 3)
Bims/Obsidian	0,119	0,128 8)	1,71 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	0,721	0,753 bis 0,921 3)
Gasbeton	0,115	0,111 9)	1,97 · 10 ⁻⁷	2,30 · 10 ⁻⁷ 2)	1,271	1,047 3)
Gips	0,404	0,314 bis 0,488 3)	4,90 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	0,666	0,754 bis 0,837 3)
Harnstoff-Formaldehyd-Schaumkunststoff	0,0343	0,0319 4)	6,85 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	1,642	nicht verfügbar
Phenolharzschaumkunststoff	0,0321	0,0326 5)	3,53 · 10 ⁻⁷	3,48 · 10 ⁻⁷ 2)	1,418	1,465 3)
Extrudierter Polystyrolschaumkunststoff	0,0300	0,0360 5)	7,42 · 10 ⁻⁷	9,42 · 10 ⁻⁷ bis 9,75 · 10 ⁻⁷ 2)	1,378	1,256 bis 1,300 3) 6)
Polyurethan-Schaumkunststoff	0,0286	0,017 bis 0,0407 5)	5,71 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	1,487	1,675 bis 2,093 3) 6)
PVC-Schaumkunststoff	0,0315	0,0310 bis 0,0400 7)	2,99 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	1,769	1,047 bis 1,465 6)
Sand	0,219	0,200 bis 0,302 3)	2,10 · 10 ⁻⁷	nicht verfügbar	1,712	0,795 bis 0,921 3)
Schaumglas	0,0492 0,0492	0,0482 1)	4,64 · 10 ⁻⁷ 4,63 · 10 ⁻⁷	4,22 · 10 ⁻⁷ bis 4,66 · 10 ⁻⁷ 2)	0,817 0,819	0,795 bis 0,879 3)

- 1) Ringversuch BAM, FIW und ITP
- 2) Berechnet aus λ , c und ρ (Literaturwerte)
- 3) Cammerer, J. S.: Tabellarium aller wichtigen Größen für den Wärme- u. Kälteschutz, 11. Aufl., VKI-Rheinhold & Mahla AG, Mannheim 1973
- 4) Kunststoffe, Bd. 52, H. 6 (1962)
- 5) Schüle, W.: Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen. Veröffentlichungen aus dem Institut für Bauphysik Stuttgart (1972), H. 71, S. 7
- 6) Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Bd. 11, Kunststoffe 3. Auflage 1960
- 7) Angabe der Fa. Messerschmidt-Bölkow-Blohm
- 8) Messung nach DIN 52 612, BAM-Prüfungsergebnisse 2.42/17 546⁰ + 1
- 9) Tye, R. P.: Thermal conductivity, Vol. 2, Academic Press, London/New York (1969)

In den Bildern 4 bis 7 sind als Beispiel die Meßergebnisse an Gips, Blähschiefer, Gasbeton und Schaumkunststoff (Polyurethan und Phenolharz) mit Literaturangaben [6] verglichen.

Die mittlere Meßunsicherheit, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten (relative Standardabweichung), beträgt unter Wiederholbedingungen für die

Wärmeleitfähigkeit

$$\frac{\bar{s}_\lambda}{\bar{x}_\lambda} = \pm 0,070$$

Temperaturleitfähigkeit

$$\frac{\bar{s}_a}{\bar{x}_a} = \pm 0,012$$

Volumenbezogene Wärmekapazität

$$\frac{\bar{s}_{\rho c}}{\bar{x}_{\rho c}} = \pm 0,070$$

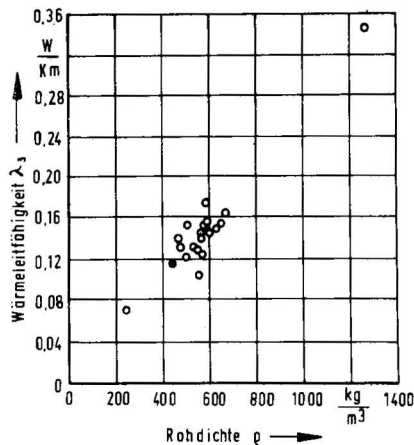


Bild 6 Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit λ_3 für Gasbeton, in Bild 2 [6] eingetragen

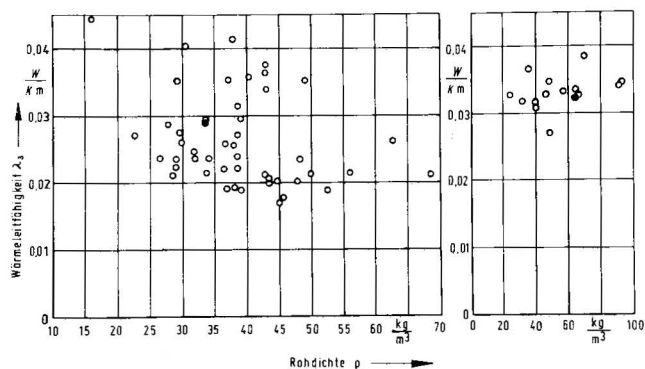


Bild 7 Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit λ_3 für PUR-Schaumkunststoff (links) bzw. Phenolharzschaumkunststoff (rechts), in Bild 21 [6] eingetragen

Literatur

- [1] Hopper, F. C., F. R. Lepper: Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. Heating, Piping & Air Conditioning 22 (August 1950), S. 129
- [2] Mann, C., F. G. E. Forsyth: Measurement of the thermal conductivity of samples of thermal insulating materials and of insulation in situ by the heated probe method. Modern Refrigeration (June 1956), S. 188
- [3] de Vries, D. A., A. J. Pech: On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils. I. Extension of theory and discussion of probe characteristics. Austr. J. Phys. 11 (1958), Nr. 2, S. 255, Nr. 3, S. 409
- [4] Woodside, W.: Probe for thermal conductivity measurement of dry and moist materials. Heating, Piping & Air Conditioning 30 (Sept. 1958), S. 163
- [5] Wagner, A.: Nichtstationäre Methode zur Bestimmung der Wärmekapazität nichtmetallischer Baustoffe. Dissertation TU Berlin (1977)
- [6] Schüle, W.: Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen. Veröffentlichungen aus dem Institut für Bauphysik Stuttgart (1972), H. 71, S. 7

Ein Beitrag zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken

Von ORR Dr.-Ing. Bernhard Böttcher und ORR Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

DK 699.86

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr.3 S. 158/164

Manuskript-Eingang 22. April 1977

Inhaltsangabe

Wärmebrücken im Hochbau weisen nicht nur erhöhte Wärmeverluste auf, sondern können vor allem auch zu Tauwasserschäden führen. Hierdurch werden die Bausubstanz beeinträchtigt und die hygienischen Wohnverhältnisse verschlechtert. Verbindliche Kriterien zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken werden zur Zeit erarbeitet. Der in dieser Arbeit diskutierte Vorschlag beruht auf einem einfachen Verfahren zur Berechnung der niedrigsten Temperatur an der raumseitigen Oberfläche an Außenbauteilen mit Wärmebrücken. Außerdem werden die unmittelbaren durch Wärmebrücken verursachten Wärmeverluste abgeschätzt.

Wärmebrücken – Beurteilungskriterien –

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines 70. Lebensjahres gewidmet

Einleitung

Bei der Errichtung von Bauten werden häufig Stoffe mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten nebeneinander angeordnet, wie z.B. Betonstützen in Ziegelmauerwerk, Stahlbetonbalken neben Deckenhohlkörpern, Fenster- und Türstürze aus Beton innerhalb von sonst ausreichend wärmegeprägten Außenwänden, Anker in mehrschaligen Wandkonstruktionen und dergleichen, Betonstützen, Stahlbetonbalken, Betonstürze und Anker bilden in den aufgeführten Beispielen stoffbedingte Wärmebrücken mit im Vergleich zu ihrer jeweiligen Umgebung erhöhten Wärmeverlusten.

Bei einem weiteren Typ, den geometriebedingten Wärmebrücken, steht einer dem Innenraum zugewandten "Erwärmungsfläche" eine im Vergleich dazu größere, an die Außenluft grenzende "Abkühlungsfläche" gegenüber. Durch die hierbei auftretende vergrößerte Kühlwirkung entstehen ebenfalls erhöhte Wärmeverluste. Beispiele hierfür sind: Gebäudeecken, Fassaden- und Flachdachvorsprünge, Fensterlaibungen, Heizkörpernischen etc.

Über die Problematik von Wärmebrücken wurde in der angeführten Literatur häufig berichtet, sie ist allgemein bekannt.

In der folgenden Arbeit wird ein einfaches Verfahren zur Berechnung der niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperatur an Wandkonstruktionen mit geometrisch einfachen stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken beschrieben und ein Vorschlag zur Berechnung der erforderlichen zusätzlichen Wärmedämmschicht angegeben. Das Verfahren eignet sich auch zur Abschätzung der Wärmeverluste.

Bisher vorliegende Kriterien zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken

Davidovici [1] hat als erster ein Verfahren zur Berechnung der minimalen raumseitigen Oberflächentemperatur an stoffbedingten Wärmebrücken vorgeschlagen. Wie eigene Untersuchungen [18] ergaben, liefert dieses Verfahren aber nur sehr unsichere, oftmals sogar falsche Ergebnisse, besonders wenn Stoffe mit sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten aneinandergrenzen.

J. Berthier u.a. [2,3,4,5,6] haben umfangreiche Untersuchungen an stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken

konstruktionen unter definierten Bedingungen in einer Klimakammer durchgeführt und zwei Kriterien zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken abgeleitet, die gleichzeitig erfüllt sein müssen:

$$\mu = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{oiw}}{\vartheta_i - \vartheta_a} < 0,25 \quad \rho_m = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{oiBr}}{\vartheta_i - \vartheta_{oiw}} < \begin{cases} 1,5 \text{ für Klima-} \\ \text{zone 1} \\ 2,0 \text{ für Klima-} \\ \text{zone 2} \end{cases} \quad (1)$$

μ, ρ_m : Koeffizienten zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken

ϑ_i, ϑ_a : Innen- und Außentemperatur

ϑ_{oiw} : Raumseitige Oberflächentemperatur des Außenbauteils ohne Wärmebrücke

ϑ_{oiBr} : Raumseitige minimale Oberflächentemperatur des Außenbauteils direkt an der Wärmebrücke

Für einige in der Baupraxis vorkommende Wärmebrückenkonstruktionen liegt der Parameter ρ_m als Funktion der geometrischen Daten und Wärmeleitfähigkeiten der Wandkonstruktion bereits vor. Der weitere Parameter μ kann leicht berechnet werden. Damit ist das Verfahren nach Berthier ein gangbarer, wenn auch mühsamer Weg zur Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken.

In Deutschland sind ebenfalls viele, vorwiegend experimentelle Untersuchungen an Baukonstruktionen mit Wärmebrücken durchgeführt worden [7 bis 15]. In jüngerer Zeit konnten die Untersuchungen durch die gezielte Anwendung numerischer Rechenverfahren intensiviert werden [15 bis 19]. In der DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau" erfolgt die Beurteilung eines Bauteils mit Wärmebrücken zur Zeit jedoch immer noch aufgrund seines mittleren sowie des an der ungünstigsten Stelle vorliegenden Wärmedurchlaßwiderstandes.

In den Niederlanden [20] wird zur Zeit ein Beurteilungskriterium unter Beachtung der an Bauteilen mit Wärmebrücken auftretenden Wärmeverluste erarbeitet.

Die Berechnung der minimalen raumseitigen Oberflächentemperatur an Bauteilen mit stoffbedingten Wärmebrücken

Das für die Untersuchungen an Baukonstruktionen mit Wärmebrücken eingesetzte Rechenprogramm wurde an anderer Stelle [18,19] eingehend – vorwiegend mit Hilfe experi-

menteller Ergebnisse anderer Autoren an stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken [2,7,8,9,10,14,15] – überprüft. Hierbei wurden auch auf numerischem Wege erzielte – zum Teil ebenfalls experimentell überprüfte – Ergebnisse [16,23] hinzugezogen. Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Temperaturverläufen waren – besonders wenn gesicherte Angaben über die Stoffkennwerte der Konstruktion sowie der im Experiment vorliegenden Randbedingungen vorlagen [2,8,14,15,16,23] – in allen Fällen geringer als ca. 10 % [19].

Nach Absicherung des Rechenverfahrens wurden allein für den Standardtyp der stoffbedingten, nicht wärmedämmten Wärmebrücke nach Bild 1 oben ca. 200 Rechnungen durchgeführt. Dabei wurde die Dicke der Wandkonstruktion zwischen $0,225 \text{ m} < s_w < 0,49 \text{ m}$, die Breite der Wärmebrücke zwischen $0,024 \text{ m} < b < 0,49 \text{ m}$ sowie die Wärmeleitfähigkeiten der Wand und der Wärmebrücke zwischen $0,035 \text{ W/(Km)} < \lambda_w < 2,04 \text{ W/(Km)}$ und $1,75 \text{ W/(Km)} < \lambda_{Br} < 46,5 \text{ W/(Km)}$ variiert.

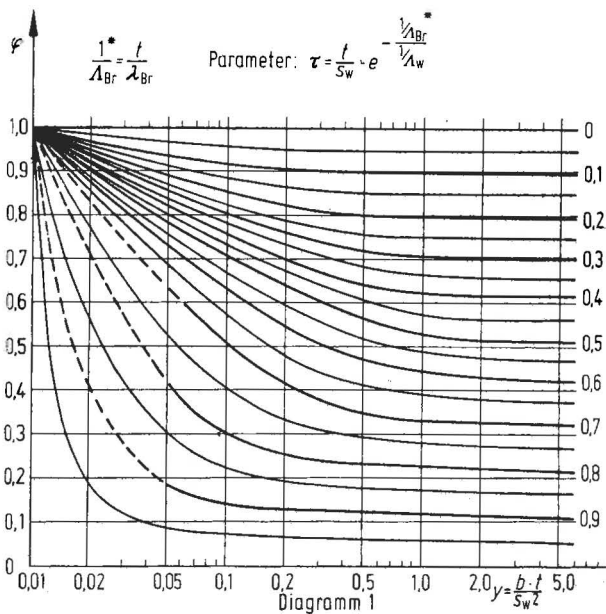
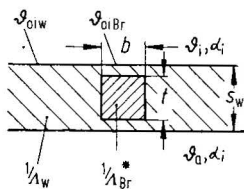


Bild 1
Diagramm zur Ermittlung des Faktors φ für Bauteile mit stoffbedingten Wärmebrücken.

Es wurde eine Vorstellung entwickelt, nach der die thermodynamische Wirkung stoffbedingter Wärmebrücken empirisch aus der Überlagerung von zwei Einflüssen erklärt werden kann. Die thermodynamische Wirkung der Wärmebrücke auf ihre Umgebung besteht in einer Herabsetzung des dortigen Wärmedurchlaßwiderstandes während die benachbarten Wandbereiche den effektiven Wärmedurchlaßwiderstand der Wärmebrücke erhöhen. Beide Einflüsse lassen sich zusammenfassend näherungsweise durch einen dimensionslosen Faktor φ erfassen, der für geometriebedingte Wärmebrücken mit dem schon von Gruber eingeführten Faktor φ_t übereinstimmt¹⁾.

Damit lassen sich geometrisch einfach aufgebaute zwei- und

dreidimensionale Wärmebrückenkonstruktionen mit dem hier vorgeschlagenen Verfahren wie eindimensionale Bauteile behandeln.

Es gelang, die Ergebnisse der Parametervariationen zusammen mit Angaben aus der Literatur in einem Diagramm nach Bild 1 darzustellen, aus dem der Faktor φ ermittelt werden kann. Es bedeuten b und t die Breite und Tiefe der Wärmebrücke, s_w die Dicke der Wand und $1/\lambda_w$ deren Wärmedurchlaßwiderstand. Der fiktive Wärmedurchlaßwiderstand der Wärmebrücke $1/\lambda_{Br}^*$ berechnet sich nach:

$$\frac{1}{\lambda_{Br}^*} = \frac{t}{\lambda_{Br}} \quad (2)$$

λ_{Br} : Wärmeleitfähigkeit des Stoffes der Wärmebrücke

Die minimale raumseitige Oberflächentemperatur an der Wärmebrücke berechnet sich nach²⁾:

$$\vartheta_{oiBr} = \vartheta_i - \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{1/\alpha_i + 1/\alpha_a + \varphi \cdot 1/\lambda_w} \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad (3)$$

ϑ_i, ϑ_a : Innen- und Außenlufttemperaturen

α_i, α_a : Wärmübergangskoeffizienten an den inneren und äußeren Wandoberflächen

$1/\lambda_w$: Wärmedurchlaßwiderstand der Wand ohne Wärmebrücke nach DIN 4108

φ : Korrekturfaktor zur Beschreibung der therm. Wärmebrückenwirkung.

Die Forderung, daß an keiner Stelle der raumseitigen Oberfläche des Bauteils eine vorgegebene Taupunkttemperatur ϑ_τ unterschritten werden darf, erfordert in kritischen Fällen die Anbringung einer zusätzlichen Wärmedämmschicht an der Wärmebrücke. Die Wärmedämmschicht sollte in ihrer Ausdehnung mindestens dreimal so groß wie die geometrische Breite der Wärmebrücke sein, ihr Wärmedurchlaßwiderstand sollte außerdem den nach Gleichung (4) berechneten Grenzwert nicht unterschreiten.

$$1/\lambda_D = \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{\vartheta_i - \vartheta_\tau} \cdot \frac{1}{\alpha_i} - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} + \varphi \cdot \frac{1}{\lambda_w} \right) \quad (4)$$

$1/\lambda_D$: Wärmedurchlaßwiderstand der zusätzlichen Wärmedämmschicht

ϑ_τ : Taupunkttemperatur

Bei einer Raumtemperatur von 20°C und einer Luftfeuchtigkeit von 60 % beträgt die Taupunkttemperatur 12°C . Da nach [26] Tab. 5 eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60 % nur in Ausnahmefällen (Wasch/Duschräume, Ver-

1) Das von W. Kast [24] angegebene χ -Diagramm liefert extrem große Korrekturfaktoren, wenn die Wärmebrücke im Vergleich zu ihrer Umgebung eine sehr viel größere Wärmeleitfähigkeit aufweist. Es ist daher für die Praxis weniger gut geeignet.

2) Bei aus der Wand auskragenden Wärmebrücken wird nach einem Vorschlag von Kast [25] α_a in den Gleichungen (3) (4) flächenproportional vergrößert eingesetzt. Ragt die Wärmebrücke mit der Breite b – Bild 1 – nach außen um die Länge s_a aus der Wand heraus, so ist infolge vergrößerter Kühlwirkung in (3) (4) für α_a der Wert $\frac{b+s}{b}$ einzusetzen.

sammlungsräume etc.) erreicht wird, stellt eine Taupunkttemperatur von 12 °C sicherlich schon die obere Grenze dar.

Für Sandwichkonstruktionen mit metallischen Deckschichten und durchgehenden Stegen als "ideale" Wärmebrücken sowie einem Wärmedämmstoff als Zwischenschicht wird φ nach Bild 2 ermittelt. Bei Konstruktionen dieser Art wird aus einem – im Vergleich zur Breite des Steges b sehr großen Bereich innerhalb der Deckschichten – fast der gesamte Wärmestrom dem metallischen Steg zugeführt. Daher gehen – im Vergleich zum eben diskutierten Typ einer stoffbedingten Wärmebrücke – hier nur geometrische Parameter, wie Breite b und Tiefe t des Steges sowie die Dicke der Deckschichten d , in den Faktor φ ein. Die Gleichungen (3) (4) behalten so ihre Gültigkeit.

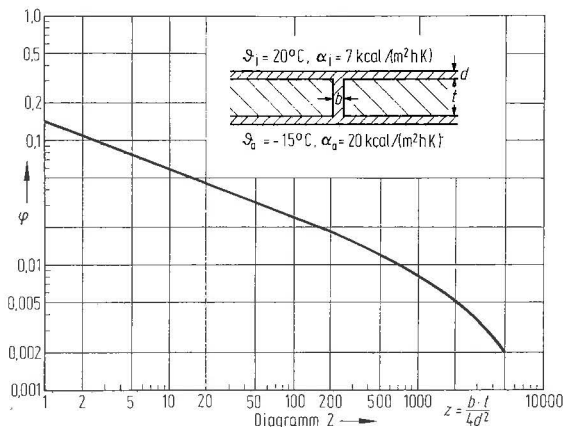


Bild 2

Diagramm zur Ermittlung des Faktors φ für mehrschalige Wandkonstruktionen mit metallischen Deckschichten und durchgehenden Stegen als Wärmebrücken sowie einem Wärmedämmstoff in der Zwischenschicht.

Bisher wurden nur Wandkonstruktionen mit stoffbedingten Wärmebrücken behandelt, die in einer Richtung – bei den Beispielen 1, 2 in Bild 5 ist das die Richtung senkrecht zur Zeichenebene – unendlich ausgedehnt sind. Wird bei sonst unveränderten Daten der Konstruktion die Ausdehnung der Wärmebrücke senkrecht zur Zeichenebene begrenzt und allmählich verkleinert, nimmt – wie empirisch abgeleitet werden kann – der fiktive Wärmedurchlaßwiderstand der Wand im Bereich der Wärmebrücke und damit auch der Faktor φ zu. Die Ergebnisse von [16, 20] und eigene Rechnungen liefern

$$\varphi = 1,5 \cdot \varphi_1 - 0,5 \cdot \frac{1/\Lambda_{Br}}{1/\Lambda_w} \quad (5)$$

φ : Korrekturfaktor für allseitig begrenzte Wärmebrücken

φ_1 : Korrekturfaktor für unendlich ausgedehnte Wärmebrücken nach Bild 1

$1/\Lambda_w$: Wärmedurchlaßwiderstand des Bauteils ohne Wärmebrücke

$1/\Lambda_{Br}$: Wärmedurchlaßwiderstand der Wandkonstruktion an der Wärmebrücke nach DIN 4108

φ ist in die Gleichungen (3),(4) einzusetzen.

Die Berechnung der minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen an Bauteilen mit geometriebedingten Wärmebrücken

Geometriebedingte Wärmebrücken lassen sich auf zwei Grundtypen, Winkel – Bild 3 – und Ecken – Bild 4 – zurückführen. Winkel entstehen, wenn zwei Bauteile, Ecken, wenn drei Bauteile zusammenstoßen. Die raumseitige minimale Oberflächentemperatur unmittelbar an der geometriebedingten Wärmebrücke berechnet sich ebenfalls nach (3). α_i ist – nach Bild 3, 4 – dabei nicht in allen Fällen identisch mit den in DIN 4108 vorgeschriebenen Wärmeübergangskoeffizienten α_i , sondern verdoppelt sich, wenn ein oder auch zwei der aufeinandertreffenden Bauteile mit beiden Oberflächen an die Raumluft grenzen.

	Anschluß zweier Außenbauteile symm. Wandaufbau	Anschluß zweier Außenbauteile unsymm. Wandaufbau	Einmündung eines Innen- in ein Außenbauteil
	3.1	3.2	3.3
φ	0,48	0,4	0,4
α_i	α_i	α_i	$2\alpha_i$

Bild 3

Winkel als geometriebedingte Wärmebrücken mit den für sie spezifischen φ -Faktoren sowie den Wärmeübergangskoeffizienten α_i .

	Ecke gebildet aus drei Außenbauteilen	Ecke gebildet aus zwei Innen- und einem Außenbauteil	Ecke gebildet aus zwei Außen- und einem Innenbauteil
	4.1	4.2	4.3
φ	0,2	0,2	0,2
α_i	α_i	$2\alpha_i$	$2\alpha_i$

Bild 4

Ecken als geometriebedingte Wärmebrücken mit den für sie spezifischen φ -Faktoren sowie dem Wärmeübergangskoeffizienten α_i .

Der φ -Faktor wurde für symmetrisch aufgebaute Winkel aus einschaligen Wänden zu 0,48 ermittelt [9]. Dieser Wert darf aber nach Auswertung der Ergebnisse von [9, 15, 17] und eigenen Untersuchungen näherungsweise auch auf Winkel aus identisch aufgebauten mehrschaligen Wänden übertragen werden. Die weiteren φ -Faktoren für Wandwinkel, an denen unterschiedlich aufgebaute Wände beteiligt sind, wurden mit Hilfe von Ergebnissen nach [9, 17] und gestützt durch eigene Rechnungen bestimmt.

Für Ecken liegen nur wenige Ergebnisse vor [9, 15], die in der BAM bisher nicht überprüft wurden. Aus ihnen lassen sich Werte von ca. $\varphi = 0,2$ ableiten. Parametervariationen für diesen wichtigen Sonderfall sind geplant.

Für den in Gleichung (3) angegebenen Wärmedurchlaßwiderstand der Baukonstruktion mit geometriebedingten Wärmebrücken ist der formal aus allen denkbaren Wärmedurchlaßwiderständen senkrecht zu den Oberflächen der Einzelbauteile gebildete Mittelwert einzusetzen. Bei der Berechnung der einzelnen Wärmedurchlaßwiderstände werden bei Winkeln nur Wege von der Schnittlinie bis zur jeweiligen Außenfläche berücksichtigt. Bei Ecken werden nur Wege von der Ecke senkrecht zu den jeweiligen Bauteilen bis zu den Außenflächen eingesetzt. Flächenanteile gehen bei dieser Betrachtung nicht ein.

Die Wärmedämmschicht sollte dabei nach [10] zweckmäßigerweise an der raumseitigen Oberfläche der Konstruktion angebracht werden und dabei in allen Raumrichtungen – vom Zentrum der Wärmebrücke aus gerechnet – eine Ausdehnung aufweisen, die mindestens der dreifachen Summe der Wanddicken der aufeinanderstoßenden Bauteile entspricht.

Berechnung der durch Wärmebrücken im Hochbau zusätzlich verursachten Wärmeverluste

Neben der – im Hinblick auf die Tauwasserbildung und deren Folgeerscheinungen – wichtigen niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperatur an Bauteilen mit Wärmebrücken interessieren auch die dort auftretenden Wärmeverluste [20].

Bei den oben erwähnten Parametervariationen am Standardtyp einer stoffbedingten Wärmebrücke – Bild 1 oben – wurden auch die Wärmeströme im gesamten Wandaufbau numerisch berechnet. Nach DIN 4108 ließen sich gleichzeitig die Wärmeströme durch eine sonst denselben Wandaufbau aufweisende Konstruktion ohne Wärmebrücke berechnen. Die Differenz zwischen den so gewonnenen Wärmeströmen ergab die tatsächlich durch die Wärmebrücke verursachten zusätzlichen Wärmeverluste $\Delta \dot{Q}$.

Bei Kenntnis des Korrekturfaktors φ sowie eines spezifischen Formkoeffizienten A – mit der Dimension einer Fläche – lassen sich auch die Wärmeverluste ermitteln. Die allgemeine Gleichung zur Berechnung des Wärmeverlustes \dot{Q}_{Br} im unmittelbaren Bereich Wärmebrücken lautet:

$$\dot{Q}_{Br} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{1/\alpha_i + 1/\alpha_a + \varphi \cdot 1/\Lambda_w} \cdot A \quad (6)$$

ϑ_i, ϑ_a : Innen- und Außentemperaturen

α_i, α_a : Wärmeübergangskoeffizienten an der Innen- und Außenseite der Konstruktion

φ : Korrekturfaktor zur Beschreibung der thermodynamischen Wärmebrückenwirkung

A : Formkoeffizient der Wärmebrücke

$1/\Lambda_w$: Wärmedurchlaßwiderstand der Wand

Für stoffbedingte in einer Richtung unendlich ausgedehnte Wärmebrücken nach Bild 1 und 2 ergibt sich als Formkoeffizient A in m^2

$$A = b \cdot 1 \cdot \frac{\varphi \cdot 1/\Lambda_w}{1/\Lambda_{Br}} \quad (7)$$

b : Breite der Wärmebrücke in m

$1/\Lambda_{Br}$: Wärmedurchlaßwiderstand an der Wärmebrücke nach DIN 4108

Der Wärmeverlust \dot{Q}_{Br} bezieht sich dabei auf eine Länge von $1 m$ der Wärmebrücke. Der Ableitung des Formkoeffizienten für stoffbedingte Wärmebrücken liegt die nur näherungsweise richtige Vorstellung zugrunde, daß sich im unmittelbaren Bereich der Wärmebrücke an der Außen- und Innenseite des Bauteils konstante Oberflächentemperaturen ϑ_{OaBr} und ϑ_{OiBr} einstellen. ϑ_{OiBr} kann nach Gleichung (3) berechnet werden, ϑ_{OaBr} läßt sich nach:

$$\vartheta_{OaBr} = \vartheta_a + \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{1/\alpha_i + 1/\alpha_a + \varphi \cdot 1/\Lambda_w} \cdot \frac{1}{\alpha_a} \quad (8)$$

ebenfalls ermitteln.

Für φ sind jeweils die oben angegebenen Korrekturfaktoren – vgl. Bild 1 bis 4, Gleichung (5) – einzusetzen, bei auskragenden Bauteilen sind – wie in Fußnote 2) beschrieben – die Wärmeübergangskoeffizienten flächenproportional zu vergrößern. Bei allseitig begrenzten Wärmebrücken mit sehr geringen Abmessungen und im Vergleich zur Umgebung großen Wärmeleitfähigkeiten – wie z. B. Ankern Bild 5, (3) – versagt die Vorstellung.

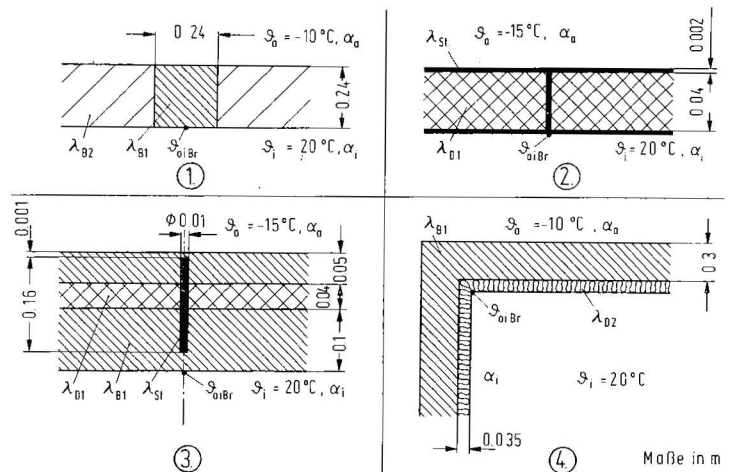


Bild 5

Beispiele von Bauteilen mit stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken. Die Wärmeleitfähigkeiten der in ihnen enthaltenen Baustoffe sowie die Wärmeübergangskoeffizienten α_i, α_a sind in Tabelle 1 enthalten.

Bei der Berechnung der allein durch das Vorhandensein stoffbedingter Wärmebrücken verursachten zusätzlichen Wärmeverluste muß der klassisch nach DIN 4108 berechnete Anteil von \dot{Q}_{Br} abgezogen werden:

$$\Delta \dot{Q} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{1/\alpha_i + 1/\alpha_a + \varphi \cdot 1/\Lambda_w} \cdot A - \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{1/\alpha_i + 1/\alpha_a + 1/\Lambda_w} \cdot b \quad (9)$$

$\Delta \dot{Q}$: Zusätzlicher Wärmeverlust an einer stoffbedingten Wärmebrücke bezogen auf $1 m$ Länge der Wärmebrücke

Für geometriebedingte Wärmebrücken sind die zusätzlichen Wärmeverluste für $1 m$ Länge der Wärmebrücke bereits durch Gleichung (6) beschrieben. Hinsichtlich der Größen $\alpha_i, \alpha_a, 1/\Lambda_w$ für stoffbedingte Wärmebrücken ist wie bei der Berechnung von ϑ_{OiBr} zu verfahren.

Für symmetrisch aus zweischaligen Wänden aufgebaute Winkel nach Bild 3.1 ergibt sich ein Formkoeffizient von:

$$A = \frac{s_i + s_a}{4} \cdot \frac{2 \cdot s_i}{2 \cdot 1/\Lambda_i + 1/\Lambda_a} \cdot \frac{1}{\Lambda_i} \quad (10)$$

$s_i, 1/\Lambda_i$: Dicke der inneren, raumseitigen Außenschale und deren Wärmedurchlaßwiderstand

$s_a, 1/\Lambda_a$: Dicke der äußeren Wandschale und deren Wärmedurchlaßwiderstand

Die zu Ableitung dieses Formfaktors herangezogene Vorstellung berücksichtigt die Abnahme der Wärmestromdichte von der raumseitigen Oberfläche zur Außenseite des Bauteils und zeigt, daß eine raumseitige Wärmedämmung – im Vergleich zu einer auf der Außenseite des Bauteils angebrachten Wärmedämmung – bei geometrischen Wärmebrücken zu wesentlich geringeren Wärmeverlusten führt.

Für den Wandwinkel, gebildet aus einer Außen- und einer Innenwand nach Bild 3.2 ergibt sich ein Formkoeffizient von:

$$A = \frac{s_i}{2} \cdot \frac{1/\Lambda_i + 2 \cdot 1/\Lambda_a}{1/\Lambda_i + 1/\Lambda_a} \quad (11)$$

$s_i, 1/\Lambda_i$: Dicke und Wärmedurchlaßwiderstand der Innenwand

$1/\Lambda_a$: Wärmedurchlaßwiderstand der Außenwand.

Mit den Gleichungen (6) bis (11) lassen sich die Wärmeverluste an den häufigsten in der Praxis auftretenden stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken abschätzen. Die dabei auftretenden Abweichungen der berechneten von den numerisch ermittelten Wärmeverlusten können bis zu etwa 20 % betragen. Zur Ableitung der angegebenen Gleichungen und Formfaktoren muß auf eine weitere Arbeit verwiesen werden [27].

Beispiele zur Berechnung der niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperatur an Außenwänden mit Wärmebrücken und den an ihnen auftretenden zusätzlichen Wärmeverlusten

Es sollen die niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperaturen ϑ_{oiBr} der in Bild 5 und Tabelle 1 zusammengestellten

Tabelle 1

Angaben zu den in Bild 5 enthaltenen Wärmebrückenkonstruktionen

Konstr. Nr.	λ_{B1} W/(K·m)	λ_{B2} W/(K·m)	λ_{St} W/(K·m)	λ_{D1} W/(K·m)	λ_{D2} W/(K·m)	α_j W/(m ² ·K)	α_a W/(m ² ·K)
①	2,04	0,23	—	—	—	5,82	23,26
②	—	—	46,52	0,047	—	8,14	23,26
③	2,04	—	46,52	0,047	—	8,14	23,26
④	2,04	—	—	—	0,093	5,82	23,26

ten Baukonstruktionen mit stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken berechnet werden. Wird dabei eine vorgegebene Taupunkttemperatur von 12 °C unterschritten, soll der Wärmedurchlaßwiderstand $1/\Lambda_D$ der zusätzlich erforderlichen Wärmedämmschicht ebenfalls ermittelt werden.

Die Einzelschritte zur Berechnung von ϑ_{oiBr} und $1/\Lambda_D$ sind aus der Tabelle 2 ersichtlich. Der Wärmedurchlaßwiderstand der Wand wird dabei nach DIN 4108 berechnet. $1/\Lambda_{BR}^*$ ist der fiktive Wärmedurchlaßwiderstand an der stoffbedingten Wärmebrücke, definiert nach Gleichung (2) y, z sind jeweils die Abszissen der Diagramme in Bild 1, 2 und werden nach den dort angegebenen Vorschriften ermittelt, Parameter τ aus Diagramm 1 in Bild 1. ³⁾ Die φ -Werte für die Konstruktionen ① und ② werden jeweils aus den Diagrammen 1 und 2 entnommen. Bei Konstruktion ③ wird nach Gleichung (5) – unter Verwendung von Diagramm 1 – gerechnet. φ ist für die vorliegende geometriebedingte Wärmebrücke aus Bild 3 zu entnehmen. Die eigentliche Berechnung von ϑ_{oiBr} und $1/\Lambda_D$ erfolgt schließlich nach den Gleichungen (3) und (4).

In Tabelle 2 sind zur Kontrolle neben den nach dem hier vorgeschlagenen φ -Verfahren berechneten Temperaturen auch die von anderen Autoren numerisch ermittelten Werte angegeben.

Die Abweichungen der nach dem φ -Verfahren berechneten niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperaturen an Wandkonstruktionen mit stoff- und geometriebedingten Wärme-

3) Der für geometriebedingte Wärmebrücken einzusetzende Wärmedurchlaßwiderstand $1/\Lambda_w^*$ wird – wie oben beschrieben – als Mittelwert aus allen denkbaren Wärmedurchlaßwiderständen senkrecht zu den Oberflächen der Einzelbauteile gebildet.

Tabelle 2

Minimale raumseitige Oberflächentemperaturen ϑ_{oiBr} zusätzliche Wärmeverluste $\Delta\dot{Q}$ und die – bei einer Taupunkttemperatur von 12 °C – zusätzlich erforderlichen Wärmedämmschichten an den Wärmebrücken. Betrachtet wurden die Baukonstruktionen nach Bild 5. Für Konstruktion ③ ist keine zusätzliche Wärmedämmschicht erforderlich.

Konstr. Nr.	$1/\Lambda_W$ m ² K/W	$1/\Lambda_W^*$ m ² K/W	y	τ	z	φ	ϑ_{oiBr}	ϑ_{oiBr}	$\Delta\dot{Q}$	$\Delta\dot{Q}$	$1/\Lambda_D$ m ² K/W
							°C	°C	W/m	W/m	
							φ -Verf.	numer.	φ -Verf.	numer.	
①	1,04	—	1,0 Bild 1	0,89 Bild 1	—	0,14 Bild 1	5,6 Gl.(3)	5,6 nach [17]	18,8 W/m Gl.(9,7)	17,7 W/m nach [17]	0,28 Gl.(4)
②	0,85	—	—	—	5 Bild 2	0,08 Bild 2	1,6 Gl.(3)	2,0 nach [BAM]	21,5 W/m Gl.(9,7)	19,3 W/m nach [16]	0,30 Gl.(4)
③	0,92	—	0,044 Bild 1	0,84 Bild 1	—	0,5 Bild 1 Gl.(5)	13,1 Gl.(3)	14,7 nach [16]	Gl.(9,7) Versagen	0,9 W nach [16]	—
④	0,52	0,52	—	—	—	0,48 Bild 3	8,9 Gl.(6)	8,9 nach [17]	1,6 W/m Gl.(6,10)	1,3 W/m nach [17]	0,18 Gl.(4)

brücken von den numerisch oder experimentell ermittelten Werten sind in den bisher betrachteten Fällen kleiner als ca. 10 %. Hierbei wurde festgestellt, daß das φ -Verfahren meist etwas zu niedrige Oberflächentemperaturen liefert, was jedoch im Hinblick auf die Praxis vorteilhaft ist. Ein Vergleich der mit Hilfe des φ -Verfahrens berechneten mit den numerisch ermittelten zusätzlich auftretenden Wärmeverlusten an den betrachteten Wärmebrücken zeigt, daß das Verfahren hier ebenfalls befriedigende Näherungswerte liefert.

Einschränkende Bemerkungen zum Anwendungsbereich des Verfahrens

An allen selbst untersuchten und in der angeführten Literatur enthaltenen Wärmebrückenkonstruktionen hat sich das oben beschriebene Verfahren – vor allem was die Berechnung der niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperatur unmittelbar an der Wärmebrücke anbelangt – gut bewährt. Es handelte sich – bei stoffbedingten Wärmebrücken – jedoch immer um einfache Konturen der Wärmebrücke wie Quader, Zylinder, Trapeze, entsprechend geformte Hohlprofile und I-Träger in Mauerwerk. Die untersuchten geometriebedingten Wärmebrücken enthielten oftmals mehrschichtige Wände, waren jedoch geometrisch einfach gestaltet. Es muß außerdem darauf hingewiesen werden, daß Wechselwirkungen zwischen eng benachbarten Wärmebrücken bisher nicht untersucht wurden.

Aus den angeführten Gründen sollten komplizierte aufgebaute Wärmebrückenkonstruktionen entweder experimentell oder mit Hilfe eines erprobten numerischen Rechenverfahrens untersucht werden.

Zur Stützung des hier vorgestellten Verfahrens muß allerdings gesagt werden, daß:

1. Bei Gültigkeit der Gleichung (3)
2. Unter den Annahme, daß der Parameter φ nur von den oben eingeführten Einflußgrößen λ_w , λ_{Br} , t , s_w , b abhängt

eine allgemeingültige Dimensionsanalyse nach dem in der Thermodynamik bekannten π -Theorem von Buckingham jeweils nur 3 dimensionslose Wertepaare zur Darstellung von φ liefert z.B.:

$$\frac{\lambda_{Br}}{\lambda_w}, \frac{t}{s_w}, \frac{b}{s_w}$$

Auch Quotienten oder Produkte aus diesen Größen – in jedem Falle jedoch ein Tripel von Wertepaaren – sind nach der Ähnlichkeitstheorie zugelassen, was die Form der Darstellung in Bild 1 rechtfertigt. In Bild 2 sind durch die Bedingungen: $\lambda_{Br} \gg \lambda_w$ und $s_{Br} = t \approx s$ bereits zwei Parameter festgelegt worden, so daß zur Darstellung von φ hier ein Parameter ausreicht.

Die numerische Betrachtung der untersuchten Konstruktion zeigte, daß der Parameter φ zumindest näherungsweise nicht von den Größen ϑ_j , ϑ_a , α_1 , α_2 abhängt.

Die Verfasser danken Frl. cand. ing. R. Müller und Herrn T. Tanaka, M.C.E. für die Durchführung der numerischen Parametervariationen an den stoffbedingten Wärmebrücken.

Literatur

- [1] P. Davidovici:
Chauffage et ventilation des piscines
Ind. Therm. 8 (1962) Nr. 1, S. 33-43
- [2] J. Berthier:
Les points faibles thermiques ou ponts thermiques
Cahiers du CSTB No. 42, Febr. 1960, Heft 334,
S. 1-35
- [3] J. Berthier, F. Clain:
Incidence des points faibles thermiques
Cahiers du CSTB No. 57, August 1962, Heft 455,
S. 1-12
- [4] J. Berthier:
Building Research Translation
Weak Thermal Points or Thermal Bridges
NBS Technical Note 710-7, May 1973, 96 S.
- [5] C. Moye:
Les Points faibles thermiques ou ponts thermiques
Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment 70
(1973) Nr. 51, S. 79-82
- [6] C. Moye:
Les points faibles thermiques ou ponts thermiques
Rev. Gén. Therm. Fr. No. 149 (1974) S. 460-462
- [7] W. Schüle, H. Schäcke:
Wärmebrücken im Wohnungsbau
Veröffentlichungen aus dem Inst. für Bauphysik,
Stuttgart 1954, Heft 29, S. 1-18
- [8] W. Schüle, H. Künzel:
Modelluntersuchungen über die Wirkung von Wärmebrücken in Wänden
Veröffentlichungen aus dem Inst. für Bauphysik,
Stuttgart 1954, Heft 29, S. 21-41
- [9] H. Künzel:
Der Wärmeschutz von Ecken
Veröffentlichungen aus dem Inst. für Bauphysik,
Stuttgart 1962, Heft 48, S. 1-2
- [10] H. Künzel:
Die Wärmebrückenwirkung von Ecken in Bauwerken
Veröffentlichungen aus dem Inst. für Bauphysik,
Stuttgart 1965, Heft 55, S. 13-15
- [11] H. Künzel:
Untersuchungen über Wärmebrücken im Wohnungsbau.
Veröffentlichungen aus dem Inst. für Bauphysik,
Stuttgart 1965, Heft 55, S. 19-20
- [12] W. Caemmerer:
Die Berechnung des mittleren Wärmedurchlaßwiderstandes beim Wärmeschutz massiver Decken.
Ges. Ing. 86 (1965) Heft 7, S. 207-210
- [13] F. Schwarz:
Experimentelle Bestimmung der bauphysikalischen Einsatzgrenzen von Außenwandkonstruktionen durch Untersuchung des Außenwandeinflusses.
Baustoffindustrie 29 (1975) Nr. 3, S. 10-13

- [14] Chr. Kupke, W. Schüle:
Bestimmung der mittleren Wärmedämmung von Bauteilen mit Wärmebrücken.
Bericht des Instituts für Bauphysik, Stuttgart, BW 141/1974, 10 S., 11 Abb.
- [15] Jàn Fehér, W. Schüle:
Untersuchungen über die Temperaturverhältnisse auf Bauteilen mit Wärmebrücken.
Bericht des Instituts für Bauphysik, Stuttgart, BW 118/1969, 53 S., 24 Abb.
- [16] K. Johannsen:
Beitrag zur Ermittlung von Wärmebrückenwirkungen in Hochbauteilen.
Dissertation, TU Braunschweig 1968
- [17] W. Gruber:
Wärmedurchgang an Ecken und vorspringenden Bauteilen im Hochbau.
Dissertation, TU Braunschweig 1969
- [18] W. Caemmerer, R. Rudolphi, B. Böttcher:
Die Behandlung von Wärmebrückenproblemen im Bauwesen mit einem numerischen Netzwerkverfahren. Materialprüfung 16 (1974) No. 11, S. 359-360
- [19] R. Rudolphi, B. Böttcher:
Ein thermoelektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen.
BAM-Berichte Nr. 32, September 1975, 24 S.
- [20] A.C. Verhoeven, Th. J.
Numerical Considerations on the Physical behaviour of Thermal Bridges with Respect of Standardization. CIB W 40 Washington Meeting 1976, 12 S.
Delft University of Technology,
Dept. of Civil Engineering,
Group Building Physics,
Stevinweg 1, Delft 8, Netherlands
- [21] DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau", Ausgabe August 1969 und "Ergänzende Bestimmungen zu DIN 4108"
Fassung vom Oktober 1974
- [22] B. Böttcher, W. Caemmerer, R. Rudolphi:
Wärmebrücken im Hochbau.
Vortragsband der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., Infrarot-Sondertagung 17./18.11.1975 Dortmund, S. 107-120
- [23] B. Adamson:
Floor slabs on ground-thermal insulation and floor-temperatures.
Synopsis and Summaries from National Swedish Building Research/Stockholm (R 40: 1973)
- [24] W. Kast:
Private Mitteilung als Beitrag zur Diskussion über Wärmebrückenprobleme zur DIN 4108 vom 12.2.1974
- [25] W. Kast:
Beitrag F im VDI-Wärmeatlas, Abschnitt F b 1
Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag Düsseldorf 1974
- [26] F. Eichler:
Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 1, Berechnungsgrundlagen.
VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 2. Auflage 1968
- [27] B. Böttcher, R. Rudolphi, A. Wagner:
Beurteilung der thermodynamischen Wirkung von Wärmebrücken im Hochbau.
Abschlußbericht des BAM-Vorhabens 12417 (ERP)
Erscheint im Herbst 1977

Heizstab-Verkrustungen in Haushaltwaschmaschinen und Phosphataufbau von Vollwaschmitteln

Von ORR Dr. Ulrich Sommer und RegDir. Dr. Helga Milster, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

DK 648.235.021 : 648.181 : 620.191.8

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr. 3 S. 164/167

Manuskript-Eing. 29. April 1977

Inhaltsangabe

An einer größeren Anzahl von Waschmitteln des deutschen Marktes wurde unter praxisüblichen Waschbedingungen untersucht, ob und welche Faktoren von Waschmitteln für eine Belagbildung auf Heizstäben von Bedeutung sind.

Nach 50 Kochwäschen in gleichen Waschmaschinen mit jeweils neuen Heizstäben wurde festgestellt, daß bei diesen Waschbedingungen z. T. erhebliche Ablagerungen unterschiedlicher Art gebildet werden. Aufgrund der Ergebnisse der papierchromatographischen Trennung und Bestimmung der Waschmittelposphate ergibt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Belagbildung auf den Heizstäben des hier verwendeten Waschmaschinentyps und der Menge an im Waschmittel enthaltenen Triphosphat in g pro Waschgang.

Waschmittelposphate – Belagbildung

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines
70. Lebensjahres gewidmet

1. Einleitung

Beim Waschen unter ungünstigen Bedingungen kann es in Haushaltwaschmaschinen zu kalkartigen Ablagerungen auf

dem Laugenbehälter, der Außenseite der Waschtrommel und insbesondere auf den Heizstäben kommen. Diese Erscheinungen sind beim verbreitetsten Maschinentyp, nämlich bei stirnbeschilderten Maschinen, vom Benutzer solcher Geräte nicht zu erkennen. Besondere Aufmerksamkeit gilt der Belagbildung auf den Heizstäben. Es wurde vielfach vermutet, daß sich solche Beläge unter bestimmten Bedingungen kor-

rosionsfördernd auswirken. Heizstabdefekte sind bei Haushaltwaschmaschinen offenbar seltener geworden. Die in Gegenwart von Chlorid-Ionen beim Wärmeübergang vom Heizstab zur Waschlauge, insbesondere beim Vorliegen von Heizstab-Verkrustungen zu erwartenden Korrosionsvorgänge [1] sind von der Materialseite [1, 2] technisch beherrschbar.

Grundlegende Untersuchungen über die Bildung von Heizstab-Verkrustungen in Waschmaschinen und über deren Ursache und Folgen sind bisher nicht veröffentlicht worden. Bekannt sind Ergebnisse über die Auswirkungen einzelner Waschmittel oder Ergebnisse von Versuchen in Haushaltwaschmaschinen ohne praxismäßige Schmutzbelastung [3]. Auch über den Einfluß der Heizstab-Oberfläche bei gleichem Anschlußwert liegen veröffentlichte Ergebnisse systematischer Untersuchungen nicht vor.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob es unter üblichen, praxismäßigen Waschbedingungen überhaupt zur Bildung von Ablagerungen auf Heizstäben von Haushaltwaschmaschinen kommt und welche Ursachen auf das Waschmittel zurückzuführen sind.

2. Auswahl und Charakterisierung der Waschmittel

Es wurden 15 handelsübliche Vollwaschmittel mit überregionaler Bedeutung ausgewählt. Diese Waschmittel repräsentieren in der Zusammensetzung und den waschtechnischen Eigenschaften praktisch den gesamten deutschen Waschmittelmarkt von Ende 1975.

Daneben wurde ein seit 1976 in Berlin erhältliches, Sasilhaltiges Waschmittel mit stark reduziertem Phosphatgehalt in die Untersuchungen einbezogen. Sasil ist ein wasserlösliches Natrium-Aluminium-Silikat vom Typ der Zeolithe. Es kann aufgrund seines Ionenaustauschvermögens Teilfunktionen der Waschmittelposphate übernehmen, nämlich die Bindung von härtebildenden Ionen in der Waschflotte. Diesem anorganischen Phosphat-Austauschstoff wird zur Zeit große Bedeutung als partieller Phosphat-Austauschstoff beigegeben.

Tabelle 1

Charakterisierung von 16 Waschmitteln – Bestandteile in %

Waschmittel	Gesamt-Phosphat berechnet als $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$	Waschaktive Stoffe (Isopropanol-lösliches)	Perborat	Na_2SO_4	Silikat berechnet als $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
A	9,9	7,0	11,1	30,5	14,9
B	26,6	10,9	17,7	21,3	7,6
C	33,6	11,8	23,8	8,7	7,0
D	31,9	9,8	28,4	7,3	4,6
E	21,6	12,6	24,6	21,6	9,4
F	37,2	13,1	26,8	7,4	3,2
G	23,5	13,8	20,0	27,8	6,5
H	27,3	13,1	24,2	21,0	6,8
J	21,6	10,2	17,2	28,8	7,3
K	34,2	11,6	24,4	11,3	6,4
L	29,7	12,1	19,9	18,3	6,9
M	26,2	12,2	16,0	29,3	8,4
N	34,5	11,2	20,9	9,6	5,4
O	30,8	14,3	24,1	6,4	6,2
P	23,3	10,8	17,0	27,6	8,4
Sa	18,5	13,4	18,7	7,9	13,8
(und 20,4 Sasil*)					
Bereich**	22 - 37	10 - 14	16 - 27	7 - 30	3 - 10

* Natrium-Aluminium-Silikat

** ohne Waschmittel A und Sa

Die 16 Waschmittel sind in Tabelle 1 durch einige analytische Kenndaten charakterisiert.

3. Durchführung der Waschversuche

Die Waschversuche wurden in mehreren Maschinen eines sehr verbreiteten Typs mantelbeschickter 4 kg-Waschautomaten durchgeführt. Das dabei angewendete Kochwaschprogramm für normal verschmutzte Kochwäsche ist durch folgende technische Daten charakterisiert: Höchsttemperatur in der Vorwäsche 50 °C, in der Hauptwäsche 88 bis 90 °C; aktive Waschzeit 22 min; Flottenverhältnis beim Waschen 1 : 5,4; Programmdauer insgesamt 125 Minuten. Diese technischen Daten wurden einschließlich des Temperaturverlaufs vor Beginn jeder Versuchsserie überprüft. Die Waschmaschine ist mit zwei U-förmigen Heizstäben aus Chromnickelstahl mit Nickeldiffusionsschicht ausgerüstet. Bei einem Anschlußwert von 2 700 W ergibt sich eine Flächenbelastung von etwa 11 Watt/cm². Bei den Waschversuchen wurden nach jeder Versuchsserie Laugenbehälter und Waschtrommel mit Calgon von eventuellen Rückständen befreit und jeweils neue, gewogene Heizstäbe eingebaut.

Es wurden mit jedem Waschmittel 50 Kochwäschen bei einer Wasserhärte von 14 - 15 °d durchgeführt. Die Beladung (3,6 kg) bestand aus durchschnittlich verschmutzter Haushaltwäsche, und zwar vorwiegend aus Gerstenkornhandtüchern, zusätzlich wurden Prüfgewebe zur Bestimmung der Gewebeanse eingesetzt. Als Waschmitteldosierung für eine Wasserhärte von 14 - 15 °d wurde der Mittelwert der Dosierungen gewählt, die vom Waschmittelhersteller für die Härtebereiche 2 (7 - 14 °d) und 3 (14 - 21 °d) empfohlen werden. Für jedes Produkt wurde durch mehrere Personen die Menge Waschmittel in g des anweisungsgemäß gefüllten Meßbechers ermittelt.

Nach 50 Kochwaschversuchen wurden Laugenbehälter, Waschtrommel und Heizstäbe visuell beurteilt, die ausgebauten Heizstäbe gewogen und die Menge des gebildeten Heizstab-Belages festgestellt. Bei einigen Waschmitteln platzten während der Waschversuche gebildete Beläge von den Heizstäben ab. Diese Krustenstücke wurden, soweit möglich, beim Abpumpen der Wasch- und Spülbäder aufgefangen und gewogen.

4. Ergebnisse der Waschversuche

Bei den angewendeten Praxisbedingungen treten zum Teil erhebliche Heizstab-Verkrustungen unterschiedlicher Art und Menge auf (s. Bild 1 und 2). Eine exakte Eingruppierung der Waschmittel bezüglich dieser Auswirkungen wird dadurch erschwert, daß in einigen Fällen sehr schnell starke, lockere Heizstab-Beläge gebildet werden, die durch raschen Temperaturwechsel während des Waschprogramms und durch die Mechanik der bewegten Waschflotte teilweise abplatzen und nicht vollständig aufgefangen werden können. Das Aussehen und die Beschaffenheit der Beläge ist sehr unterschiedlich. Häufig sind die Beläge an der Unterseite der Heizstäbe, also an der dem Laugenbehälter zugewandten Seite, stärker.

Die Versuchsergebnisse für die Belagbildung auf den Heizstäben sind in Abschnitt 6 in der Tabelle 3 mit aufgeführt. Nach 50 Wäschen bewirkten die Waschmittel B, C, D, F und O geringe, K, N und Sa deutliche, die Waschmittel A, E, G, H, J, L und M starke und das Waschmittel P sehr starke Be-

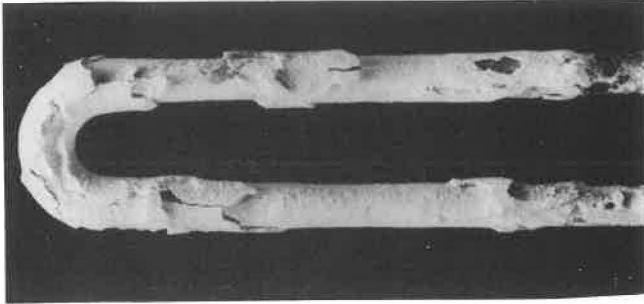


Bild 1

Heizstab nach 50 Wäschen mit Waschmittel P

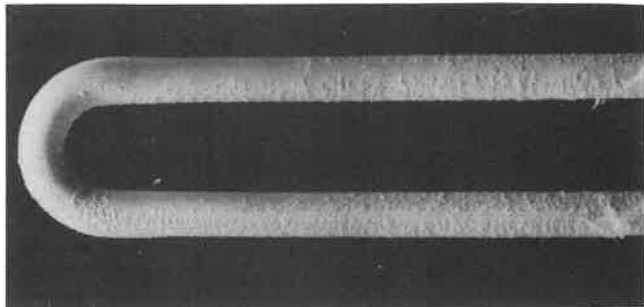


Bild 2

Heizstab nach 50 Wäschen mit Waschmittel N

läge auf den Heizstäben. Die Waschmittel A, L und J bewirkten außerdem geringe, Waschmittel P deutliche Ablagerungen auf Waschtrommel und Laugenbehälter. Die Gewebeanzeige an Baumwollstandardgewebe nach 50 Wäschen liegt bei den meisten der untersuchten Waschmittel unter 0,5 %. Lediglich die Waschmittel Sa (2 %), M (4 %), P (12 %) und A (14 %) ergaben eine deutliche bzw. starke Gewebeankrustierung.

Zu den Ergebnissen ist zu bemerken, daß die Belagbildung auf Maschinenteilen von weiteren, hier nicht untersuchten Faktoren wie Gestaltung des Waschprogramms, Temperaturverlauf, Material und Belastung der Heizstäbe, Schmutzbelastung der Waschlöte u.ä. abhängen wird.

Bei orientierenden Versuchen mit stark verkrusteten Heizstäben konnte mit definierter Versuchsapparatur die Vermutung, daß sich Aufheizzeiten (zeitgesteuerte Waschautomaten) oder Stromverbrauch durch inkrustierte Heizstäbe erhöhen, nicht bestätigt werden.

5. Phosphataufbau der Waschmittel

Das in Vollwaschmitteln fast ausschließlich eingesetzte, geringe Mengen anderer Phosphate enthaltende Triphosphat wird bei der technischen Verarbeitung zu Waschmitteln durch den Sprühprozeß teilweise weiter zu Pyro- und Orthophosphat abgebaut.

Bereits früher wurde die Zusammensetzung der Waschmittelphosphate, ausgedrückt als Verhältnis von Tri- zu Pyrophosphat, als wesentlicher Faktor für die Bildung von Gewebeankrustungen erkannt [4]. Auch für die Untersuchung der Ursachen für die Belagbildung auf Waschmaschinen-Heizstäben ist die Kenntnis der Art der im Waschmittel vorliegenden Phosphate von Bedeutung.

Bei den jetzt untersuchten Waschmitteln lagen die photometrisch nach üblichem Verfahren ermittelten Werte für Gesamtphosphat, berechnet als $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, im Bereich von etwa 10 bis 37 %. Zur Ermittlung des darin enthaltenen, nicht abgebauten Triphosphats wurden die Waschmittelphosphate nach Abtrennung der Seife papierchromatographisch mit dem Laufmittel Isopropanol/Wasser/Trichloroessigsäure/Ammoniak getrennt. Die Phosphatzonen wurden nach Besprühen mit Ammoniummolybdat-Reagenz durch UV-Bestrahlung sichtbar gemacht, ausgeschnitten, einzeln mit Perchlorsäure mineralisiert und die hydrolysierten Phosphate photometrisch nach der Molybdänblau-Methode bestimmt. Die Ergebnisse der Phosphat-Trennung sind in Tabelle 2 angegeben. Das aus den getrennten Phosphaten errechnete Gesamtphosphat ist in der Regel etwas höher als bei der Gesamtphosphat-Bestimmung. Der Triphosphat-Gehalt liegt bei diesen Waschmitteln zwischen 8 und 30 %, der Pyrophosphat-Gehalt zwischen 3 und 11 %. Der Orthophosphat-Gehalt ist mit 1 bis 3 % unbedeutend. Insgesamt ergeben sich für diese Waschmittel mit einer Ausnahme für den Triphosphat-Anteil bezogen auf das Gesamtphosphat Werte von etwa 75 bis 90 %.

Tabelle 2

Phosphatzusammensetzung bei 16 Waschmitteln in %

Waschmittel	Gesamt-Phosphat berechnet als $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$	Triphosphat $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$	Pyrophosphat $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$	Orthophosphat $\text{Na}_3\text{P O}_4$	Triphosphat vom Gesamt- Phosphat
A	9,9	7,9	2,5	1,4	80
B	26,6	23,7	3,1	1,4	89
C	33,6	28,4	5,3	1,6	85
D	31,9	27,0	5,3	1,3	85
E	21,6	18,6	4,2	1,5	86
F	37,2	29,7	8,4	2,1	80
G	23,5	18,7	4,8	1,2	80
H	27,3	21,9	5,8	1,4	80
J	21,6	19,2	3,2	2,1	89
K	34,2	27,5	6,2	1,3	80
L	29,7	22,3	7,4	1,9	75
M	26,2	20,0	7,3	1,8	76
N	34,5	25,3	7,0	2,0	73
O	30,8	26,9	4,2	1,6	87
P	23,3	12,9	10,8	3,3	55
Sa	18,5	—	—	—	—
Bereich*	22 - 37	13 - 30	3 - 11	1 - 3	55 - 89

*ohne Waschmittel A und Sa

Bei dem Sasil-haltigen Produkt Sa konnte mit diesem Trennverfahren eine zufriedenstellende Trennung nicht erreicht werden. Durch Zugabe von Sasil zu einem phosphathaltigen Waschmittel wurde bestätigt, daß Sasil diese Phosphat-Trennmethode stark beeinträchtigt. An der analytischen Phosphat-auftrennung in Gegenwart von Sasil wird gearbeitet, da für die Zukunft mit einem Teilersatz der Waschmittelphosphate durch Sasil zu rechnen ist.

Bei den Produkten A, B und J sind zusätzlich die Carbonat-Gehalte von 18 % (A) und 6 % (B, J) bemerkenswert.

6. Zusammenhang zwischen Belagbildung und Waschmittelphosphat-Aufbau

Ein Zusammenhang zwischen Belagbildung auf Heizstäben und Waschmittelphosphaten ist naheliegend. Allerdings gibt der Gesamtphosphat-Gehalt der Waschmittel nur im Zusammenhang mit der Dosierung und dem Triphosphat-Anteil

Tabelle 3

Zusammenhang zwischen Gesamtposphat bzw. Triphosphat in Waschmitteln in g pro Waschgang und der Belagbildung auf Heizstäben in Haushaltwaschmaschinen bei 15 °d Wasserhärte

Waschmittel	Dosierung (g)	Gesamt-Phosphat* (g/Waschgang)	Triphosphat (g/Waschgang)	Belagbildung auf Heizstäben nach 50 Wäschen (g)	visuell beurteilt	Gewebeasche (%)
K	325	111,2	89,4	4	deutlich	< 0,5
F	260	96,7	77,2	1	gering	< 0,5
O	280	86,2	75,3	2	gering	< 0,5
C	265	89,0	75,3	2	gering	< 0,5
D	270	86,1	72,9	3	gering	< 0,5
B	305	80,9	72,3	1	gering	< 0,5
N	255	88,0	64,5	5	deutlich	< 0,5
J	330	71,7	63,4	> 6**	stark	< 0,5
E	335	71,7	62,3	11	stark	< 0,5
L	270	80,2	60,2	> 15	stark	< 0,5
H	250	66,9	54,8	> 8**	stark	< 0,5
M	270	70,7	54,0	> 11**	stark	4
G	270	63,7	50,5	> 8**	stark	< 0,5
P	360	84,3	46,4	> 30	sehr stark	12
A	325	32,2	25,7	11	stark	14
Sa	265	49,0	ca. 40***	5	deutlich	2

* berechnet als Triphosphat

** abgeplatzter feinkörniger Belag konnte nicht aufgefangen werden

*** geschätzt

der Gesamtposphate einen Bezug zu den Heizstab-Inkrustierungen. Tabelle 3 zeigt deutlich, daß die Belagbildung auf Heizstäben offenbar von der Menge des im Waschmittel enthaltenen Triphosphats, hier in g pro Waschgang angegeben, abhängt. Bei einer Triphosphat-Menge bis etwa 70 g pro Waschgang ist die Belagbildung bei den angewendeten Versuchsbedingungen gering, bei Triphosphat-Werten unter 70 g ist auch bei höherem Gesamtposphat (in g pro Waschgang) mit stärkeren Heizstab-Verkrustungen zu rechnen.

Das Sasil-haltige Produkt Sa läßt sich in diese Aussage nicht mit einbeziehen. Da eine Trennung der Phosphate bei diesem Produkt nicht möglich war, kann der Triphosphat-Gehalt nur geschätzt werden. In der Regel lagen bei den anderen Waschmitteln etwa 75 - 90 % des Gesamtposphats als Triphosphat vor. Nimmt man für dieses Produkt einen Anteil Triphosphat von etwa 80 % an, so ergeben sich für Sa etwa 40 g Triphosphat pro Waschgang. Trotz dieses sehr niedri-

Materialprüfung und Sicherheitstechnik

Von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller †, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

DK 620.1 : 658.382.31 : 614.8

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr. 3 S. 167/171

Manuskript-Eingang 21. März 1977

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines 70. Lebensjahres gewidmet

Technische Risiken

Die Technik (Bild 1) hat mit dem Einzug in alle Lebensbereiche des Menschen nicht nur ständig fortschreitend Erleichterungen, Bequemlichkeiten und Luxus gebracht, sondern in zunehmendem Maße zugleich auch Probleme und Risiken für das Wohlergehen der menschlichen Gesellschaft geschaffen. Das zeigt sich z.B. an Situationen folgender Art:

gen Triphosphat-Wertes, der ohne Sasil-Zusatz aufgrund der obigen Ergebnisse zu sehr starker Belagbildung führen müßte, erhält man mit dem Produkt geringere Ablagerungen auf den Heizstäben der Waschmaschine.

7. Zusammenfassung

An einer größeren Anzahl von Waschmitteln des deutschen Marktes wurde unter praxisüblichen Waschbedingungen untersucht, ob und welche Faktoren von Waschmitteln für eine Belagbildung auf Heizstäben von Bedeutung sind.

Nach 50 Kochwäschen in gleichen Waschmaschinen mit jeweils neuen Heizstäben wurde festgestellt, daß bei diesen Waschbedingungen z. T. erhebliche Ablagerungen unterschiedlicher Art gebildet werden. Aufgrund der Ergebnisse der papierchromatographischen Trennung und Bestimmung der Waschmittelposphate ergibt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Belagbildung auf den Heizstäben des hier verwendeten Waschmaschinentyps und der Menge an im Waschmittel enthaltenen Triphosphat in g pro Waschgang.

Den beteiligten Mitarbeitern danken wir für die sorgfältige Durchführung der Arbeiten, insbesondere Fräulein Volz für die analytischen Arbeiten.

Literatur

- [1] Herbsleb, G., Schwenk, W. Werkstoffe und Korrosion 26 (1975) 2, S. 93 - 103
- [2] DIN-Entwurf 50 930, 4. Oktober 1976 Korrosion der Metalle, Korrosionsverhalten von metallischen Werkstoffen gegenüber Wasser, hochlegierte und chemisch beständige Stähle
- [3] Merkenich, K., Henning, K., Gudernatsch, H. Seifen-Öle-Fette-Wachse 100 (1974) 18, S. 433 - 39 und 458 - 60
- [4] Milster, H. Seifen-Öle-Fette-Wachse 94 (1968) 19, S. 591-95

– Bei Fragen des Wasserschutzes geht es z.B. um die Vermeidung oder um die Minderung der Verschmutzung von Flüssen, Seen und Grundwasser durch Abfallprodukte der Industriebetriebe und durch Abwässer der Städte und Gemeinden. Zu nennen ist auch die Gefahr der Verschmutzung von Meeren, Seen und Flüssen z.B. durch Leckagen der Öltanker oder gar bei Havarien mit den Folgeerscheinungen für Tier und Mensch.

– Bei der Beseitigung von Müll- und Abfallprodukten, d.h. bei der Entsorgung, z.B. bei der Beseitigung von Kunst-

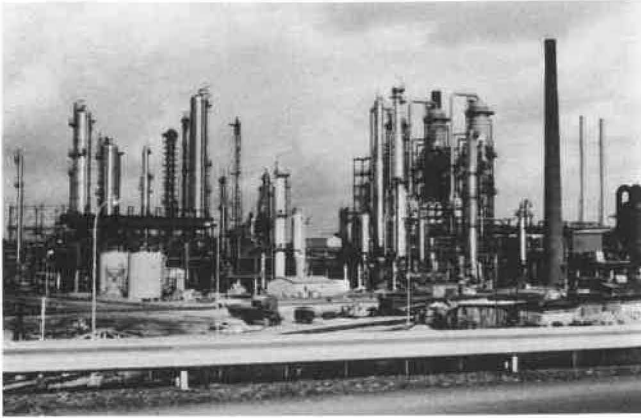


Bild 1
Anlagen und Einrichtungen zur Veredlung von Rohstoffen und zur Gewinnung von Ausgangsstoffen und Halbfertigprodukten in der chemischen Industrie

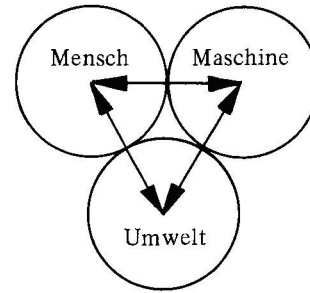
stoffen, von gefährlichen und giftigen Stoffen und in neuester Zeit bei der Entsorgung von Kernbrennstoffen.

- Beim Lärmschutz geht es u.a. um die Verminderung des durch moderne technische Einrichtungen und Verfahren verursachten Lärmeinflusses und um die Verhinderung von Gehörschäden, z.B. bei der Technik der Explosionsumformung, beim Einsatz von Rammen, Bohrern, Baggern usw. in der Bautechnik und beim Einsatz von Düsentriebwerken in der Luftfahrttechnik.
- Bei der "Reinhaltung der Luft" handelt es sich um die Beseitigung von schädlichen Stoffen fester, dampfförmiger oder gasförmiger Art, z.B. bei der Energiegewinnung in Kraftwerken oder in Motoren.
- Beim Nachbarschaftsschutz spielt der Schutz von Objekten, die in der Nachbarschaft von Kernkraftwerken, Raffinerien, Fabriken zur Herstellung von Sprengstoffen oder analogen gefährdenden Anlagen liegen, eine nicht unerhebliche Rolle.
- Fragen der Sicherheit im Verkehr, wie sie spezifisch und z.T. unterschiedlich auf der Straße, auf der Schiene, zu Wasser und in der Luft auftreten und der Lösung bedürfen.

Die hier vorgestellten Probleme sind nur beispielhaft aufgeführt. Ihnen gemeinsam stellt sich mit der Frage nach mehr Bequemlichkeit und nach mehr Luxus die Frage nach der Verminderung oder gar der Beseitigung von Unannehmlichkeiten und Gefährdungen für die menschliche Gesellschaft.

Sicherheitstechnik

Aus einem natürlichen Sicherheitsbedürfnis heraus erhebt der Mensch meist die Forderung nach der absoluten Sicherheit. In keinem System jedoch ist eine absolute Sicherheit möglich, d.h. ein Risiko mit dem Zahlenwert "Null" wird es nicht geben. Stets wird ein gewisser Anteil eines Risikos, das sogenannte Restrisiko, bleiben. Bei der Beurteilung der Sicherheit von technischen Anlagen, Einrichtungen und Verfahren wird also die Frage zu klären sein, wie groß der Wert des Restrisikos noch sein darf, um in dem allgemeinen System



in der Öffentlichkeit noch als tragbar zu gelten. Aufgabe der sich mit diesen Fragen befassenden Sicherheitstechnik ist es also, technische Einrichtungen, Anlagen und Verfahren so zu gestalten und zu handhaben, daß für alle Beteiligten das Risiko eines Schadens auf ein Mindestmaß reduziert wird. Die menschliche Gesellschaft ist in ihrer Gesamtheit dabei aufgefordert, eine Aussage darüber abzugeben, welches Restrisiko sie bereit ist zu tragen. Hierbei geht es nicht nur um die Beantwortung der Frage nach dem wirtschaftlichen Risiko und dem volkswirtschaftlichen Nutzen, sondern um die Beantwortung der grundsätzlichen Frage nach dem Risiko für Gesundheit und Leben der Menschen.

Die volkswirtschaftliche Grundaufgabe der Industrie ist die Belieferung des Marktes mit stets neuen und fortschrittlichen Produkten, die selbst sicher sind und spezifisch stets gleichbleibende Qualitätsmerkmale und Güterwerte aufweisen. Voraussetzung dafür ist wiederum die Zuverlässigkeit und Funktionssicherheit technischer Anlagen. Mit der Zuverlässigkeit und der Funktionssicherheit von technischen Systemen, Verfahren, Einrichtungen und Produkten ist auch die Sicherheit des Einzelnen und die Sicherheit der Allgemeinheit in der Regel gewährleistet.

Materialprüfung

Das Funktionieren der vielschichtigen und komplizierten technisierten Welt, d.h. die Wechselbeziehung zwischen dem Drängen nach mehr Bequemlichkeit und dem Bedürfnis nach Sicherheit ist eng verknüpft mit der Entwicklung der Materialprüfung. Die Materialprüfung ist einmal die routinemäßige Prüfung von Stoffen, Einrichtungen, Verfahren und Produkten nach bekannten Standardmethoden, zum anderen aber auch die Entwicklung und Erforschung neuer Prüfmethoden (Bild 2). Beides ist untrennbar miteinander verbunden. Bei ständiger technischer Evolution sind Neuentwicklungen, Neukonstruktionen, Verbesserungen, Anpassungen und Erprobungen neuer Methoden und neuer Ein-

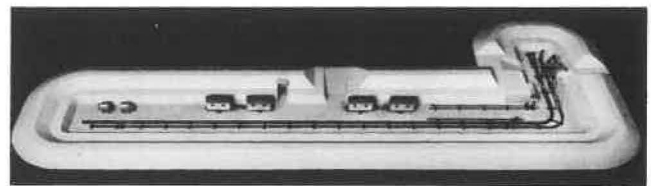


Bild 2
Modell von Prüfeinrichtungen auf dem Versuchsgelände der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) im Grunewald zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kennwerten von Stoffen, Einrichtungen und Produkten

- a) Rohrleitungen verschiedener Längen und mit unterschiedlichen Durchmessern zur Untersuchung
 - des Verhaltens von technischen Gasen in Abhängigkeit verschiedenster Parameter
 - des Verhaltens von Werkstoffen bei Krafteinwirkungen
- b) Gefäße und Vorrichtungen für Untersuchungen der Wirksamkeit von Druckentlastungsvorrichtungen

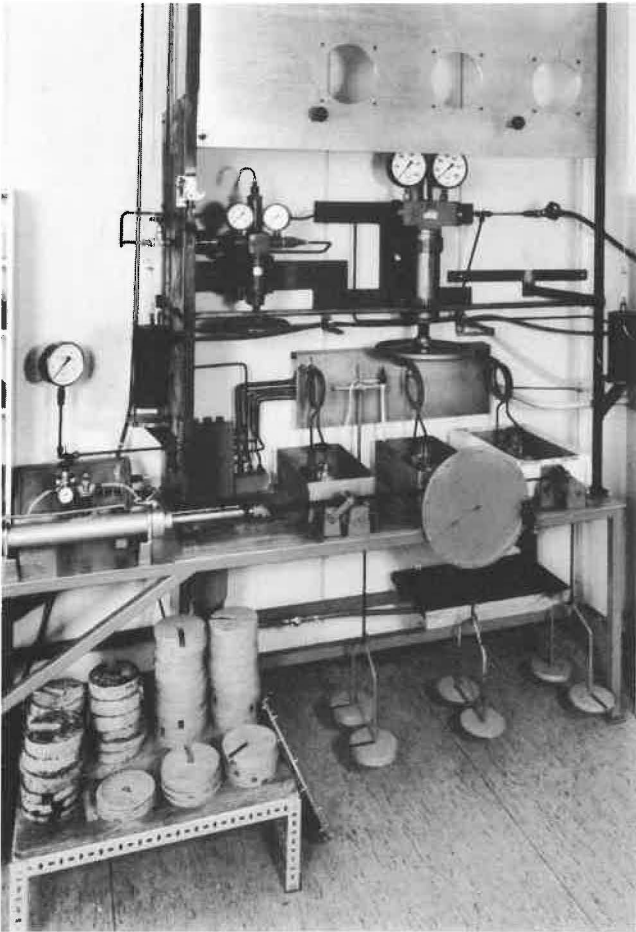


Bild 3
Apparatur zur Prüfung der Funktionssicherheit von Ausrüstungsteilen für Druckgas-Behälter

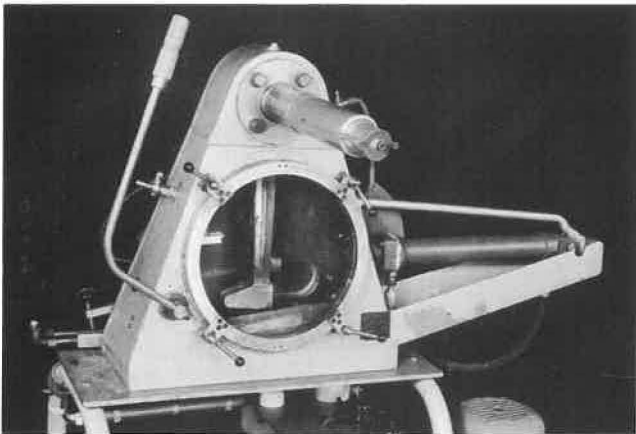


Bild 4
Apparatur zur Untersuchung der Bildung mechanisch erzeugter Funken und ihrer Wirkung auf Brenngas/Luft- bzw. Brenngas/Sauerstoff-Gemische und auf Brenngase

richtungen zwingend notwendig (Bilder 3 und 4). Die Materialprüfung erkundet die Zusammensetzung und Struktur der Stoffe, sie ermittelt die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Stoffe und sie bestimmt die Widerstandsfähigkeit der Stoffe gegen angreifende Medien und Kräfte (Bilder 5 und 6). Sie untersucht die Möglichkeiten der Verarbeitung und der Beeinflussung von Stoffen allein, mit- und untereinander. Sie führt Untersuchungen aus, um Fehler von Stoffen und Konstruktionen zu entdecken und dieses, wenn möglich, zerstörungsfrei. Sie führt

Schadensanalysen durch, um Ursachen von Unfällen zu ermitteln und um diese letztlich abstellen zu können (Bilder 7 und 8). Die aus Prüfung und Untersuchung und aus Forschung und Entwicklung im stetigen Wechsel erhaltenen Kenn- und Gütwerte von Stoffen, Verfahren, Einrichtungen und Produkten stellen Kriterien dar. Sie ermöglichen Aussagen sowohl in wirtschaftlicher als auch in sicherheitstechnischer Hinsicht, sie sind somit wirtschafts- und sozialpolitisch von Bedeutung. Mit ihren Ergebnissen trägt die Materialprüfung dazu bei, daß Anlagen, Verfahren, Einrichtungen und Produkte zuverlässig und funktionssicher zum Nutzen der Allgemeinheit und mit spezifischen Sicherheitsstandards errichtet, verwendet oder betrieben werden können.

Bei der Entwicklung von Prüfmethode und Prüfanlagen geht es darum, Einrichtungen und Verfahren zu entwickeln und zu konstruieren, die eine Aussage über die Eignung verschiedener Stoffe, Einrichtungen und Produkte für bestimmte Verwendungszwecke ermöglichen und dieses auch reproduzierbar und damit gesichert erlauben. Bei der Prüfung selbst werden die in der Praxis zu erwartenden Bean-

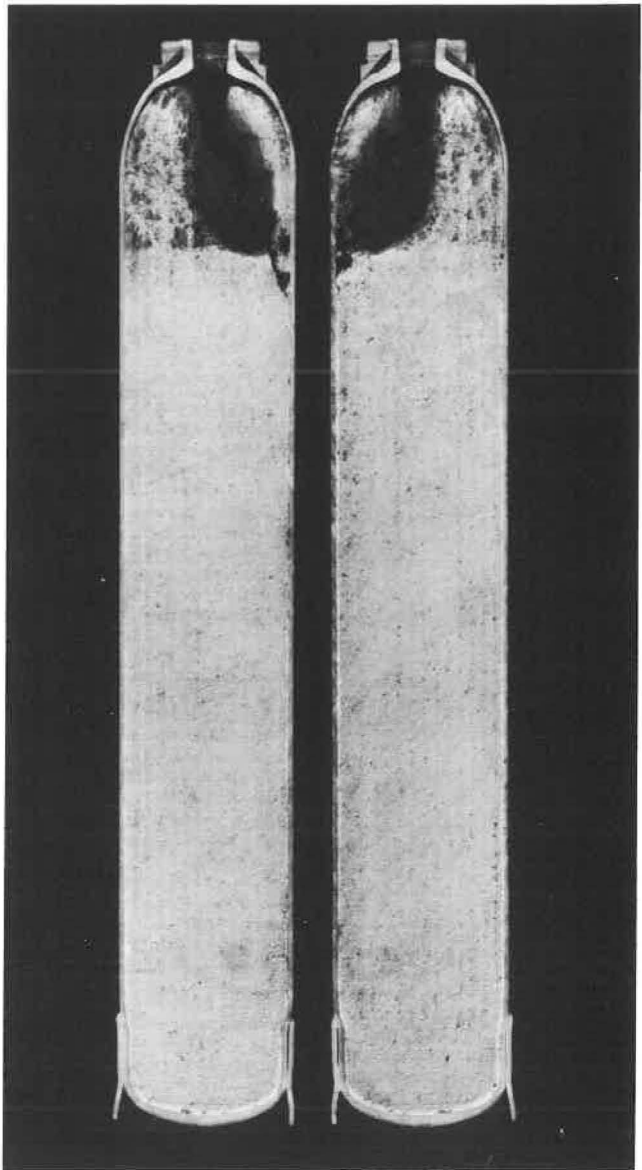


Bild 5
Ergebnis von Untersuchungen über die Eignung von porösen Massen für Acetylen-Druckgas-Behälter

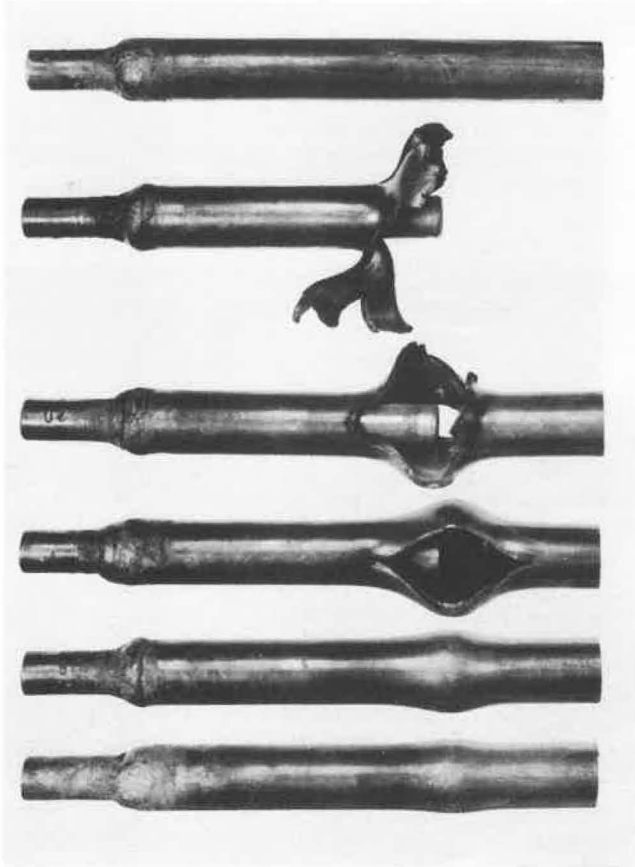


Bild 6
Ergebnis von Untersuchungen über die Widerstandsfähigkeit von Rohrenden gegenüber explosiv verlaufenden Vorgängen



Bild 7
Schadensfall in einer Druckgasflaschen-Batterie-Anlage

spruchungen simuliert und sie werden in der Regel verschärft, um die Grenzen der Belastbarkeit von Stoffen, Einrichtungen und Produkten zu ermitteln. Ein vorläufiger Abschluß der Entwicklung eines Prüfverfahrens ist dann gegeben, wenn es Eingang in eine nationale oder internationale Prüfrichtlinie gefunden hat. Dieses kann als Norm oder auch rechtsverbindlich als Technische Regel von Arbeitsschutz-Rechtsvorschriften geschehen. Die dann nach solch einer Prüfrichtlinie ausgeführte "Routineprüfung" erlaubt den Vergleich von Stoffen und Produkten miteinander, ermöglicht Aussagen über die Qualität und Güte und setzt auch Maßstäbe hinsichtlich der Sicherheit bei gefährbringenden Stoffen, Produkten, Verfahren oder Einrichtungen. Zwangsweise führt die sorgfältige Prüfung einer großen Zahl von Ergebnissen aus der Routineprüfung, ergänzt durch Unter-

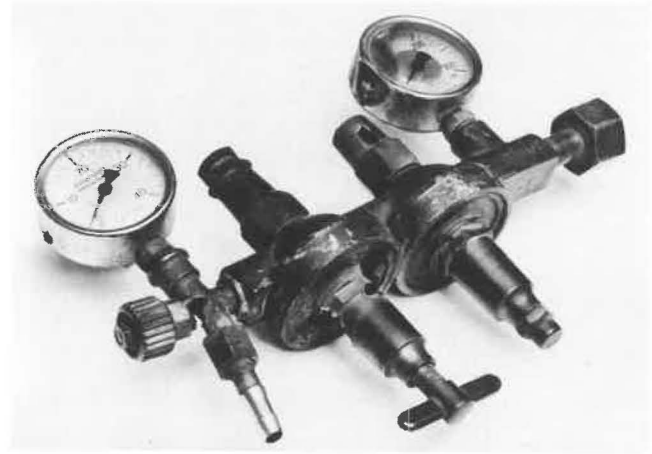


Bild 8
*Schadensfall an einem Ausrüstungsteil
 hier: ausgebrannter Sauerstoff-Druckminderer*

suchungen von möglicherweise vorgekommenen Schadensfällen, zur Verbesserung und Anpassung, gegebenenfalls auch zur Neuentwicklung von Prüfmethoden und Prüfverfahren, die in der Regel auch zu besseren Aussagewerten führen.

Fortschritt – Materialprüfung – Sicherheit

Ein Beispiel für die Wechselbeziehungen in der Technik zwischen Fortschritt und Bequemlichkeit einerseits und Fortschritt und Sicherheit andererseits und der damit zusammenhängenden Materialprüfung stellt die Entwicklung der Prüfmethoden über die Eignung poröser Massen als Füllmassen für ortsbewegliche Druckgasbehälter dar:

Acetylen, 1836 von Edmund Davy entdeckt, 1892 mit dem Aufzeigen der technischen Gewinnung von Calciumcarbid durch Wilson in Amerika und Moissan in Frankreich in die Technik eingeführt, fand 1903 in Deutschland Eingang als Brenngas in die Technik des autogenen Schweißens. Die Speicherung und Handhabung des Brenngases Acetylen in ortsbeweglichen Behältern unter Druck ist gefahrlos möglich, wenn die Behälter vollständig mit einer porösen Masse gefüllt sind und sie ein geeignetes Lösungsmittel enthalten. Die ersten grundlegenden Prüfungen von porösen Massen in Deutschland führte die Zentralstelle für wissenschaftlich-technische Untersuchungen in Neu-Babelsberg aus. Sie begannen um 1915 und erstreckten sich u.a. auf Brand- und Erhitzungsversuche, auf Sprengversuche mit Trinitrotoluol, auf Beschußversuche mit Gewehrkugeln, auf Stoß- und Schlagversuche und auf Zündversuche an mit poröser Masse und A-Lösung gefüllten Behältern. Die Prüfmethoden und Prüfapparaturen wurden in der Nachfolgeanstalt, der Chemisch-Technischen Reichsanstalt, in den Jahren von 1920 bis etwa 1927 ergänzt, ersetzt und verbessert und dem jeweiligen Stand der Technik angepaßt. Eine weitere Vervollkommnung der Prüfmethoden für poröse Massen wurde in der Nachfolgeanstalt nach 1945, in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), in den Jahren zwischen 1955 und 1975 vorgenommen. Ein in neuerer Zeit wiederum vorläufiger Abschluß in der Entwicklung der Prüfmethoden auf diesem Gebiet stellen national die Technische Regel zur Druckgasverordnung

TRG 762 "Richtlinie für das Prüfen von porösen Massen und von Lösungsmitteln für Acetylen-Flaschen durch die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) – Ausgabe November 1974"

und international die ISO-Richtlinie

ISO/DIS 3807 "Dissolved Acetylene Cylinders – Basic Requirements – Ausgabe 10.7.1975"

dar. Grundlagen beider Richtlinien sind die Ergebnisse der Prüfungen und Untersuchungen und der Forschungen und Entwicklungen der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) und der beiden Vorgängeranstalten.

Aus einer Vielzahl von Einzelergebnissen aus Prüfung und Untersuchung, aus den Erkenntnissen aus Forschung und Entwicklung, insbesondere in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), und aus den Entwicklungen technischer Innovationen war es im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte unter Erreichen eines hohen Sicherheitsstandards möglich, die zulässigen Füllmengen an Acetylen ständig zu steigern und sicherheitstechnisch für zulässig zu erklären. Während anfangs etwa 5 kg Acetylen in 40-l-Flaschen für die sog. Autogenverfahren zur Verfügung standen, können heute um 8 kg Acetylen, z.T. je nach poröser Masse auch mehr, gefahrlos in 40-l-Flaschen gefüllt und gehandhabt werden. Ein solcher Fortschritt – höhere Füllung und bessere Nutzung in der Wirtschaft unter gleichzeitig auch gestiegenem Sicherheitsstandard – ist ohne Materialprüfung im weitesten Sinne nicht denkbar.

Materialprüfung, Mittler zwischen Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Politik

"Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Politik stellen für moderne Staaten eine unlösbare Einheit dar. Alle vier Denk- und Handlungsbereiche wirken ständig aufeinander ein und jeder einzelne dieser Bereiche trägt Verantwortung für die anderen Bereiche mit" [1]. Die Wissenschaft hält die Grundlagen bereit und sorgt für neue Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung. Die Technik nutzt die durch die Wissenschaft gegebenen Grundlagen und stellt der Wirtschaft Entwicklungen und Möglichkeiten zur Verfügung. Die Wirtschaft ist damit in der Lage, Lebensmöglichkeiten für die Menschen zu schaffen. Die Wirtschaft schafft mit ihrem Überschuß wieder die Handlungsmöglichkeit für die Politik

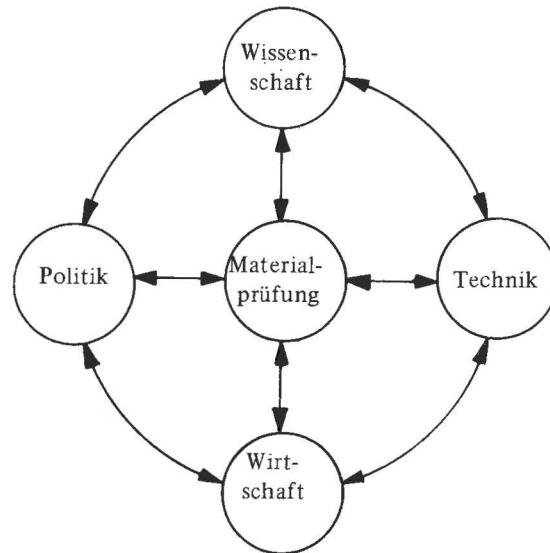


Bild 9
Einheit von Wissenschaft, Technik, Wirtschaft, Politik und Materialprüfung

und sie sorgt rückwirkend aus ihrem Überschuß für das Wachstum von Wissenschaft und Technik. Die Politik wiederum achtet auch auf die Einhaltung sicherheitstechnischer Erfordernisse. Mittler zwischen den Bereichen ist die Materialprüfung mit der kritischen Prüfung, der objektiven Beurteilung, der systematischen Sammlung von Kenndaten und der uneigennütigen sachlichen Information zum Nutzen der Allgemeinheit, auch unter Berücksichtigung notwendiger sicherheitstechnischer Erfordernisse (siehe Bild 9).

Schrifttum

- [1] Pfender, M.:
Von der Einheit der Wissenschaft, Technik Wirtschaft und Politik;
BAM Jahresbericht 1970, S. 6

Die Entwicklung der Verschleißforschung im Rahmen der Tribologie

Von **ORR Prof. Dr. Horst Czichos** und **ORR Dr. Karl-Heinz Habig**, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin DK 620.178.16.001.5

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr. 3 S. 171/179

Manuskript-Eingang 22. April 1977

Inhaltsangabe

Die Arbeit gibt einen Überblick über die Entwicklung der Verschleißforschung in den letzten 50 Jahren. Neben der Erforschung der grundlegenden Verschleißmechanismen wird auf die Entwicklung und Anwendung der hydrodynamischen und elastohydrodynamischen Schmierungstheorie eingegangen. Die für das komplexe Verschleißgebiet besonders wichtigen Ordnungsfragen werden bis hin zur Systemanalyse tribologischer Vorgänge behandelt.

Verschleißforschung – tribologische Vorgänge

Herrn Professor Dr.-Ing. M. Pfender zur Vollendung seines
70. Lebensjahres gewidmet

1. Einleitung

„Verstand und in Ethik und Moral begründete Vernunft

verweisen auf die Klugheit und die Gerechtigkeit sinnvollen Sparens im Umgang mit menschlichen Mühen, in der Nutzung schließlich begrenzter Stoffe und im Verbrauch entlastender Energie. Es ist um der Existenz aller Menschen willen notwendig, das Können, die Stoffe und die Energieformen zweckmäßig, voll und angepaßt einem komplexen Sy-

stem mit bestmöglichem Wirkungsgrad zur Erweiterung und Sicherung der Lebensmöglichkeiten zu nutzen, also dem Verderb und Verschleiß oder gar der Verschwendung und Verschleuderung mit Mut und Ausdauer entgegenzuwirken und mögliche negative Auswirkungen einseitigen Vorteilsdenkens zu verhindern".

Diese Worte schrieb Pfender als Geleitwort zum Forschungsbericht „Tribologie“, dem zusammenfassenden Abschlußbericht über das Schwerpunktprogramm „Verschleiß, Reibung, Schmierung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft [1]. Sie wurden im Juli 1971 formuliert, d. h. mehrere Jahre, bevor die Öffentlichkeit durch die „Energiekrise“ und die Berichte des Club of Rome über die „Grenzen des Wachstums“ in verstärktem Maße auf die zukünftigen Energie- und Rohstoffprobleme aufmerksam gemacht wurde. Den Fragen der optimalen Nutzung von Stoffen und Energie hat Pfender während seiner gesamten Tätigkeit als Präsident der Bundesanstalt für Materialprüfung große Aufmerksamkeit gewidmet. Im folgenden wird versucht, einen Überblick über die Entwicklungsphasen eines wesentlichen Arbeitsgebietes zur Erhöhung der Nutzung von Werkstoffen, nämlich der Verschleißforschung, zu geben.

2. Die Bedeutung verschleißbedingter Materialverluste

Wirtschaftliche Abschätzungen haben ergeben, daß in Industrieländern der Größenordnung von England, Japan oder der Bundesrepublik Deutschland durch Verschleiß und durch verschleißbedingte Folgeschäden Verluste in der Höhe von etwa 10 Milliarden DM jährlich entstehen [2, 3]. Bereits 1950 hatte Vogelpohl am Max-Planck-Institut für Reibungsforschung, Göttingen, die Verluste der deutschen Volkswirtschaft durch Reibung und Verschleiß auf mehrere Milliarden DM im Jahr geschätzt [4].

Im Gegensatz zu anderen Formen des Unbrauchbarwerdens technischer Werkstoffe, bei denen häufig ein „Recycling“ möglich ist, läßt sich im Fall des Verschleißes von Werkstoffen ein Wiederaufbereiten nur schwer durchführen, da beim Verschleiß der Materialverlust in den meisten Fällen in Form von mikroskopisch kleinen Abriebpartikeln anfällt. Verschleiß stellt somit einen unwiederbringlichen Verlust von Werkstoffen dar. Auf zu erwartende Engpässe in bestimmten Lagerwerkstoffen oder Edelmetall-Kontaktwerkstoffen ist bereits von verschiedenen Stellen hingewiesen worden.

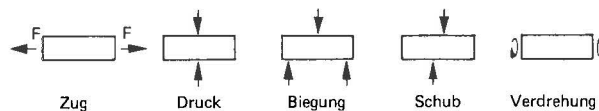
Aus den genannten Gründen sind in allen Industrieländern verstärkte Anstrengungen zu beobachten, die Verschleißverluste einzuschränken. Die Bemühungen führten bekanntlich im Jahre 1966 zur Schaffung des Begriffs „Tribologie“ als inzwischen international anerkannten Oberbegriff für alle Vorgänge, die mit der Umwandlung und dem Verlust von Energie und Material in mechanisch bewegten Oberflächenkontakten zusammenhängen (Tribology: „The science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices“ [5]).

3. Ziele der Verschleißforschung

Es ist seit langem bekannt, daß Reibung und Verschleiß komplexe Prozesse sind, die von einer großen Vielfalt von Vorgängen und Einflußgrößen bestimmt und beeinflußt werden. Durch die Einführung des Begriffs Tribologie erscheint es – zumindest aus der Sicht der Werkstoffwissenschaften und der Materialprüfung – möglich, die Vielfalt der Reibungs- und Verschleißvorgänge in vereinheitlichender Be-

trachtungsweise als Folge von „tribologischen Beanspruchungen“ aufzufassen. Unter Benützung dieser Begriffe in Verbindung mit den in den letzten Jahren entwickelten Methoden der Systemanalyse komplexer Vorgänge wurde es möglich, in DIN 50320 „Verschleiß“, Entwurf November 1976 eine Fachgrundnorm für das komplexe Gebiet des Verschleißes vorzustellen. Hiernach entstehen tribologische Beanspruchungen durch Kontakt und Relativbewegung von Körpern, wobei das betrachtete Bauteil im allgemeinen als Grundkörper und der Körper, durch den die Beanspruchung hervorgerufen wird, als Gegenkörper bezeichnet wird. Letzterer kann in festem, flüssigem oder gasförmigem Aggregatzustand vorliegen.

(A) Beanspruchung des Werkstoff-Volumens durch Kräfte und mechanische Spannungen → Festigkeitslehre → Festigkeitskenngrößen



(B) Beanspruchung der Werkstoff-Oberfläche durch Kontakt und Relativbewegung mit einem Gegenkörper → Tribologie → Reibungs- und Verschleißkenngrößen

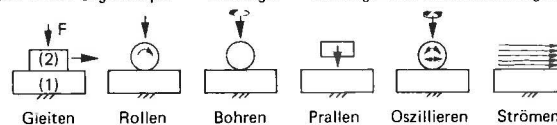


Bild 1

Arten der Beanspruchung von Werkstoffen

Der wesentliche Unterschied zwischen einer tribologischen Beanspruchung, durch die Verschleiß hervorgerufen wird, und einer rein mechanischen Beanspruchung, die zur elastischen und plastischen Deformation und im schlimmsten Fall zum Bruch führen kann, siehe Bild 1, liegt in folgenden Punkten:

- Eine tribologische Beanspruchung ist primär in den Oberflächenbereichen wirksam.
- Bei tribologischen Beanspruchungen treten zwischen den Partnern außer den kräftemäßigen auch stoffliche Wechselwirkungen auf.

Mit dem Begriff der tribologischen Beanspruchung lassen sich die vielfältigen Formen des Verschleißes mit der folgenden allgemeinen Definition beschreiben: „Verschleiß ist der Vorgang eines fortschreitenden Materialverlustes aus der Oberflächenschicht eines festen Körpers infolge tribologischer Beanspruchungen. Verschleiß äußert sich in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten Oberflächenbereiche sowie im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen, den Verschleißpartikeln“.

Das Ziel der Verschleißforschung liegt nun in der Aufklärung der Prozesse und Mechanismen, die zur Abtrennung von Verschleißpartikeln führen und darauf aufbauend in der gezielten Einschränkung von Materialverlusten durch Verschleiß. Hierzu können bei gegebener Beanspruchung im wesentlichen zwei verschiedene Wege beschritten werden:

- Trennung der Verschleißpartner durch einen lasttragenden, flüssigen oder gasförmigen Zwischenstoff auf der Grundlage der Hydrodynamik und Elastohydrodynamik.
- Einsatz von geeigneten tribotechnischen Werkstoffen auf der Grundlage von Kenntnissen über die den Ver-

schleiß bewirkenden mechanischen und physikalisch-chemischen Vorgänge.

Im folgenden soll die historische Entwicklung der hydrodynamischen und elastohydrodynamischen Schmierung (a) und der Aufklärung von Verschleißmechanismen (b) dargestellt werden.

4. Die Entwicklung der Hydrodynamik und der Elastohydrodynamik

Ausgehend von den Navier-Stokesschen Gleichungen formulierte Reynolds im Jahre 1886 die nach ihm benannte Grundgleichung der hydrodynamischen Theorie [6]. Hierbei wies er nach, daß zum Aufbau eines lasttragenden Ölfilms ein keilförmiger Spalt in Strömungsrichtung des Ölfilms erforderlich ist.

In den Jahren 1902 bis 1904 führte Stribeck in der „Centralstelle für wissenschaftlich-technische Untersuchungen“, Berlin-Neubabelsberg – einem der Vorgängerinstitute der jetzigen Bundesanstalt für Materialprüfung – umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Gleitlagern und Wälzlagern durch [7]. Diese Ergebnisse führten zu der nach ihm benannten Stribeck-Kurve. In einer ausführlichen Arbeit über die Bedeutung der Ergebnisse von Stribeck für die Entwicklung der hydrodynamischen Schmierungstheorie erwähnt Vogelpohl im Jahre 1954 [8], daß Biel bereits 1920 darauf hingewiesen hat, daß die Stribeck-Kurve das allgemeine Reibungsverhalten eines geschmierten Gleitreibungssystems darstellt.

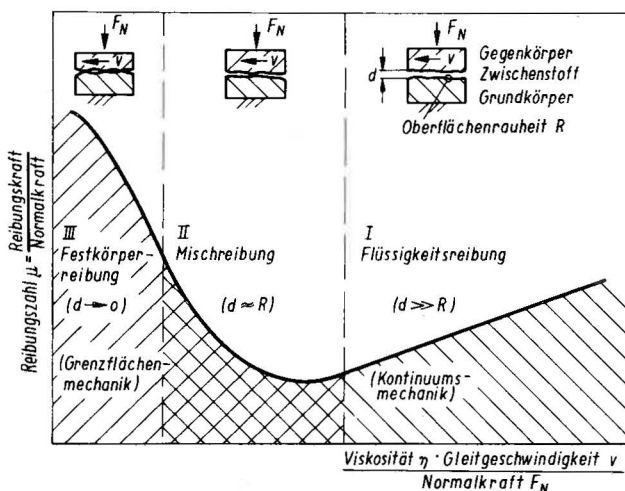


Bild 2
Die Stribeck-Kurve

Die Stribeck-Kurve, wie sie in Bild 2 schematisch vereinfacht wiedergegeben ist, stellt die Abhängigkeit der Reibungszahl μ , d. h. des Quotienten aus Reibungskraft und Normalkraft, von einer Kombination kennzeichnender Parameter – nämlich Viskosität η , Gleitgeschwindigkeit v und Normalkraft F_N – dar. Das Gleitreibungssystem besteht aus den beiden, sich relativ zueinander bewegenden Gleitpartnern, die in Bild 2 rechts oben als Grundkörper und Gegenkörper bezeichnet sind, und dem flüssigen Zwischenstoff, dem Schmierstoff. Im Bereich I, der bei geeigneter konstruktiver Gestaltung des Gleitsystems durch hinreichend hohe Werte von Viskosität, Gleitgeschwindigkeit und niedrige Werte der Normalkraft erzielt wird, liegt die angestrebte Flüssigkeitsreibung vor. Die Gleitpartner werden durch hydrodynamische

Effekte von einem geschlossenen Ölfilm der wesentlich dicker als die Summe der beiden Oberflächenrauheiten ist, getrennt. Mit abnehmenden Werten der Parameterkombination der Abszisse nimmt die Filmdicke ab, und es können sich im Übergangsbereich von Gebiet I zu Gebiet II erste Festkörperkontakte bemerkbar machen. Im Gebiet II reicht die Filmdicke nicht aus, um die Gleitpartner ständig zu trennen; es tritt Mischreibung auf. Dieser Reibungszustand ist dadurch gekennzeichnet, daß innerhalb der Kontaktfläche örtlich und zeitlich verteilt, partiell Flüssigkeitsreibung und partiell Festkörperreibung vorliegen kann. In diesem Bereich kann es zu einem nicht unerheblichen Verschleiß kommen. Überwiegt der Anteil der unmittelbaren Berührung der Gleitpartner, so spricht man auch von Grenzreibung. Die Stribeck-Kurve macht deutlich, daß eine verschleißfreie Vollschrüierung nur in Bereich I von Bild 2 möglich ist.

Ausgehend sowohl von den theoretischen Grundlagen der Reynolds-Gleichung als auch von den experimentellen Ergebnissen von Stribeck wurde im Jahre 1904 eine explizite Lösung für die Druckverteilung und die Reibung in einem unendlich langen Radial-Gleitlager von Sommerfeld in einer berühmten klassischen Abhandlung gegeben [9]. In den Jahren 1914 bis 1917 konnten dann die bisher bekannten Ergebnisse der hydrodynamischen Schmierungstheorie von Gümbel zusammengefaßt werden [10]. Die Ergebnisse der Theorien von Sommerfeld und Gümbel wurden jedoch von der Praxis zunächst wenig beachtet. Erst die praxisgerechte „Aufbereitung“ dieser Ergebnisse durch Falz [11] und dann im Jahre 1958 durch Vogelpohl mit seinem Buch „Betriebssichere Gleitlager“ [12] führte zu einer verbreiteten Anwendung der Ergebnisse der hydrodynamischen Schmierung.

Als eine Ausweitung der hydrodynamischen Schmierungstheorie für nichtkonforme Kontaktpartner ist die Theorie der Elastohydrodynamik (EHD) entwickelt worden. Die Theorie der Elastohydrodynamik verbindet die Methoden der Hydrodynamik mit der Hertzschen Theorie deformierbarer Körper. Es werden dabei die elastische Deformation der Körper und die Abhängigkeit der Viskosität des Schmierstoffes vom Druck (Druckviskosität) berücksichtigt.

Eine erste Formel für die elastohydrodynamische Schmierfilmdicke wurde ausgehend von den Hertzschen Gleichungen der Elastizitätstheorie bei Berücksichtigung der Druckviskosität im Jahre 1949 von Ertl und Grubin [13] angegeben. Im Jahre 1961 konnten Dowson und Higginson die bis zu diesem Zeitpunkt erzielten Ergebnisse der EHD-Theorie zu einer einzigen Formel für die Filmdicke unter der Voraussetzung ideal glatter Oberflächen zusammenfassen [14]. Die gegenwärtigen Bemühungen konzentrieren sich darauf, den Einfluß der Oberflächenrauheit der Kontaktpartner einzubeziehen [15] sowie die Beanspruchungsgrenzen von EHD-Filmen zu untersuchen [16].

Die Hydrodynamik und die EHD bilden die Voraussetzung für einen verschleißfreien Betrieb von technischen Bewegungssystemen im Bereich I der Stribeck-Kurve (Bild 2). Es werden aber auch gleichzeitig die Grenzen eines verschleißfreien, störungslosen Betriebes deutlich:

- (a) Mit zunehmenden Werten der Parameterkombination $\eta \cdot v F_N^{-1}$, also z. B. mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit v kann die laminare Strömung im rechten Teil des Bereichs I der Stribeck-Kurve in eine turbulente Strömung übergehen.

- (b) Mit abnehmenden Werten der Parameterkombination $\eta \cdot v F_N^{-1}$, also z. B. mit abnehmender Gleitgeschwindigkeit v treten im linken Teil des Bereichs I der Stribeck-Kurve Festkörperberührungen der Gleitpartner auf. In den Bereichen II und III der Stribeck-Kurve ist somit stets mit Verschleißvorgängen zu rechnen.

5. Die Entwicklung der Verschleißforschung

Eine erste Periode der systematischen Verschleißforschung begann in Deutschland Ende der 20er Jahre [17]. Füchsel beschrieb im Jahre 1929 den Verschleiß von Metallen als einen Prozeß der Materialverformung in Oberflächenbereichen und einem nachfolgenden „Abblättern“ des verformten Metalls [18].

Im Jahre 1928 entdeckte Fink bei Wälzverschleißuntersuchungen an Metallen neben der mechanischen auch eine chemische Abnutzungskomponente. So bildeten sich auf den Reibflächen von Kupferscheiben bei der Wälzreibung Kupferoxide, die sich auch im anfallenden Verschleißstaub nachweisen ließen. Die durch die Reibung bewirkte Oxidation hatte eine wesentlich höhere Geschwindigkeit als die normale Oxidation. Fink nannte dafür zwei mögliche Gründe:

- (a) Erhöhte Durchlässigkeit der Oxidschicht für Sauerstoff als Folge der mechanischen Beanspruchung
- (b) Gesteigerte Reaktionsfähigkeit des Metalles infolge plastischer Deformation

Fink bezeichnete diese Vorgänge zunächst als Walzoxydation, verwendete später aber nach einem Vorschlag von Hanemann den Ausdruck „Reiboxydation“ [19], der dem heutigen Begriff Tribooxidation gleichzusetzen ist. Die zuerst bei Wälzbeanspruchungen beobachtete Tribooxidation wurde später von Mailänder und Dies auch bei Gleitbeanspruchungen gefunden [20]. Diese Autoren wiesen zusätzlich auf die Bedeutung des Verhältnisses der Härte des „tribochemisch“ gebildeten Oxids zur Metallhärte hin. Danach sollen Tribooxide den Verschleiß erhöhen, wenn sie härter als das unter ihnen liegende Metall sind; sie üben dagegen eine Schutzwirkung aus, wenn Oxid- und Metallhärte annähernd gleich sind.

Während man die Tribooxidation als Wechselwirkung zwischen den Verschleißpartnern und dem gasförmigen oder flüssigen Zwischenstoff bzw. Umgebungsmedium ansehen kann, können die Verschleißpartner auch selbst miteinander „reagieren“, wobei sogenannte Mikroverschweißungen gebildet werden. Über diesen unter dem Begriff „Adhäsion“ bekannten Themenkreis wurde in den 30er Jahren in Deutschland von Holm [21] und in England von Bowden und Tabor [22] gearbeitet. Dabei gelangte man zu der Erkenntnis, daß beim Kontakt von Oberflächen nur in mikroskopisch kleinen Bereichen eine wahre Berührung stattfindet. Es wurde daher neben dem Begriff der geometrischen, nominellen oder scheinbaren Berührungsfläche auch der Begriff der wahren Kontaktfläche eingeführt.

Über einen anderen Verschleißvorgang, der häufig auf den Flächen von Zahnrädern und in Wälzlagern beobachtet und als Grübchenbildung bezeichnet wird, wurden ebenfalls in den 30er Jahren Untersuchungen von Ulrich und Niemann veröffentlicht [23]. Ersterer weist schon damals darauf hin, daß die Grübchen durch Ribbildung infolge von Wechselbeanspruchungen auftreten. Heute faßt man diese Vorgänge unter dem Begriff Oberflächenzerrüttung zusammen.

So zeigte sich, daß die Verschleißprozesse wesentlich komplexer waren als man ursprünglich angenommen hatte und daß die Verschleißforschung vor großen Schwierigkeiten stand, auf die Siebel im Jahre 1938 mit folgenden Worten hinwies [24]:

„Die Verschleißforschung litt bis vor kurzem unter dem Mangel einer zweckmäßigen Gemeinschaftsarbeit. Metallurgen und Maschineningenieure mußten zunächst mit rein mechanischen Einrichtungen, durch die die Beanspruchungen im Betrieb nachgeahmt wurden, nach Verfahren suchen, um den Verschleißwiderstand verschiedener bereits vorhandener Werkstoffe zu vergleichen und neue verschleißfestere Werkstoffe zu finden. Da die aus solchen Versuchen gefundenen Ergebnisse oft den vorliegenden Betriebserfahrungen widersprachen, wurde nahezu von allen Forschern auf die physikalisch-chemischen Effekte, die neben den mechanisch-technologischen Vorgängen in den Verschleißflächen wirksam sind, nachdrücklich hingewiesen. Es ist einleuchtend, daß selbst planmäßige Untersuchungen zur Entwicklung verschleißfester Werkstoffe, die von der Grundlage der Gefügebeobachtung ausgehen, solange ein Tasten im Dunkeln bleiben müssen, solange man nicht die Vorgänge kennenlernt, die sich in den Verschleißflächen abspielen. Dabei gilt es, die Beziehungen zwischen diesen Vorgängen und den langjährigen Betriebserfahrungen zu finden und festzustellen, wie die äußeren Betriebsbedingungen den Ablauf der Vorgänge beeinflussen. Für diese Untersuchungen genügen jedoch die rein mechanischen Verfahren nicht mehr. Hier kann nur eine enge gemeinschaftliche Arbeit von Physikern, Chemikern, Metallurgen, Elastizitäts- und Plastizitätstheoretikern, Konstrukteuren und Betriebsleuten wirkliche Erfolge bringen.“

Mit dem zweiten Weltkrieg endete in Deutschland auch in der Verschleißforschung eine recht fruchtbare Periode; es folgte eine gewisse Wiederholung der Arbeiten in den USA und in England in den 50er Jahren.

Um 1952 erkannten Feng, Burwell und Strang [25], daß man zwischen adhäsiv bedingtem Materialübertrag und zwischen Abrieb in Form von losen Verschleißpartikeln unterscheiden müsse. Kerridge [26] zeigte später, daß übertragene metallische Partikel tribochemisch oxidieren und dann als lose Partikel abgerieben werden können. Zusammen mit Lancaster [27] beobachtete er ferner, daß übertragenes Material auch unmittelbar abgetragen werden kann, wobei es zu schwerem Verschleiß (severe wear) kommt.

Neben dem Verschleiß von rein metallischen Paarungen, ist auch der Verschleiß von Werkstoffen durch mineralische Stoffe ein in der Praxis fast noch häufiger anzutreffender Vorgang, der als Abrasion bezeichnet wird. Hierzu veröffentlichten Wellinger und Uetz 1955 eine grundlegende Arbeit [28], in der auf die große Bedeutung der Härte des angreifenden Minerals im Vergleich zur Werkstoffhärte hingewiesen wurde. Über ähnliche Untersuchungen berichtete zu gleicher Zeit aus der UdSSR Khrushov [29].

Voranehend wurden die vier Verschleißmechanismen „Oberflächenzerrüttung, Abrasion, Adhäsion und Tribooxidation“ als besonders wichtig herausgestellt. Gemeinsam wurden sie erstmals 1957 von Burwell in einer viel beachteten Arbeit [30] behandelt und als wesentlich für den größten Teil der Verschleißprozesse angesehen.

In der Bundesrepublik Deutschland erkannte man Ende der 50er Jahre, daß ein Nachholbedarf zu den seit dem 2. Welt-

krieg im Ausland durchgeführten Arbeiten bestand und daß man unbedingt Anschluß an den internationalen Stand der Grundlagenforschung auf dem Verschleißgebiet gewinnen müsse, um darauf aufbauend die verschleißbedingten Materialverluste einzuschränken und so die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu stärken. Unter Federführung von Pfender und Augustin wurde ein Rahmenplan erstellt [31] und auf dessen Grundlage von der Deutschen Forschungsgemeinschaft ein Schwerpunktprogramm „Verschleiß, Reibung und Schmierung“ von 1960 bis 1969 finanziell gefördert. Unter gleichem Titel wurde mit dem Aufbau und der Herausgabe einer Dokumentation der Weltliteratur auf diesem Gebiet in der Form einer Titelbibliographie begonnen [32]. Außerdem konnten sich mit Hilfe dieses Programmes junge Wissenschaftler in die Verschleißforschung einarbeiten.

Infolge der Möglichkeit der interdisziplinären Bearbeitung von Verschleißproblemen, der Entwicklung empfindlicher Verschleißmeßtechniken und dem Einsatz der neuen Oberflächenuntersuchungsverfahren wie z. B. Mikrosonde und Rasterelektronenmikroskop, die etwa ab 1965/66 in der Verschleißforschung eingesetzt werden konnten, wurde auf verschiedenen Bereichen der Anschluß an den internationalen Stand der Forschung erreicht. So konnte auch das Dominieren der vier genannten grundlegenden Verschleißmechanismen bestätigt werden und ihre Erscheinungsformen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie sichtbar gemacht werden [33, 34]. Wegen ihrer Wichtigkeit sollen diese Mechanismen nachfolgend nochmals zusammenfassend erläutert und durch charakteristische Bilder von Verschleißflächen anschaulich dargestellt werden [35, 36] (Bild 3).

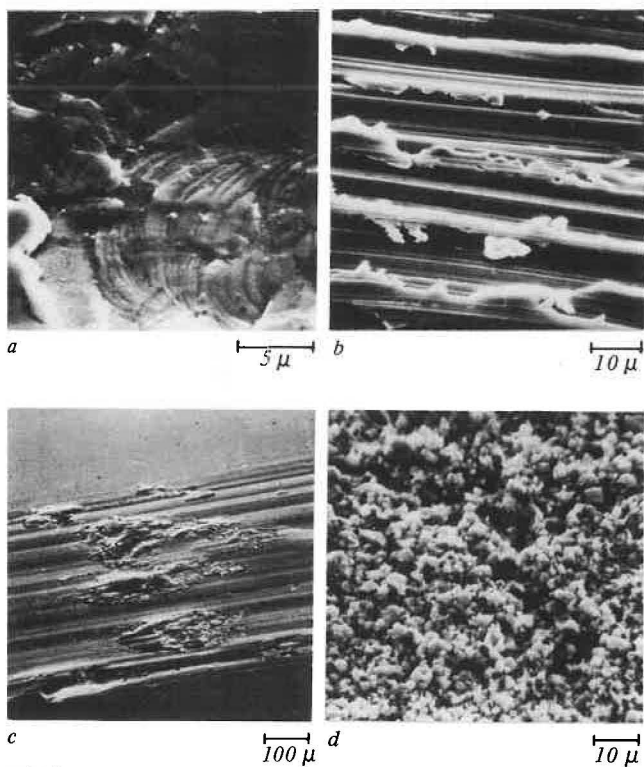


Bild 3
Erscheinungsformen der vier grundlegenden Verschleißmechanismen
(a) Oberflächenzerrüttung (c) Adhäsion
(b) Abrasion (d) Tribooxidation

Der Verschleißmechanismus der „Oberflächenzerrüttung“ sei zuerst behandelt. Bekanntlich treten bei einer Druckbe-

anspruchung gekrümmter elastischer Körper unterhalb der Kontaktfläche Schub- und Druckspannungen auf, die durch die Hertzchen Spannungsverteilungen beschrieben werden. In theoretischen Spannungsanalysen unter Verwendung der Methode der finiten Elemente konnte gezeigt werden, daß sich durch die kombinierte Wirkung der Normalkräfte und der tangentialen Reibungskräfte neben dem ersten Spannungsmaximum unterhalb der Oberfläche ein zweites Spannungsmaximum an der Oberfläche ergibt [37]. Es ist offensichtlich, daß bei Mehrfachübergleiten ein ständiger Wechsel von mehrachsigen Zug- und Druckspannungen in und unterhalb der Kontakt-Grenzfläche auftritt. Wie in Bild 3 a in einem Rasterelektronenmikroskopbild wiedergegeben, können dabei Zerrüttungsrisse quer zur Bewegungsrichtung resultieren. Durch das Zusammenwirken mehrerer Zerrüttungsrisse können dann, wie im mittleren Teil des Bildes sichtbar, lose Verschleißpartikel entstehen.

Ein zweiter Verschleißmechanismus ist als „Abrasion“ bekannt. Dieser Mechanismus kann vorzugsweise dann auftreten, wenn harte Rauheitshügel eines Gegenkörpers oder harte Partikel in die Oberflächenbereiche von Werkstoffen eindringen. Wie in Bild 3 b wiederum in einer Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme wiedergegeben, werden Riefen erzeugt oder kleine Teilchen in einer Art „Mikrozerspannungsprozeß“ abgetrennt.

Während bei den beiden ersten Verschleißmechanismen „Oberflächenzerrüttung“ und „Abrasion“ die Werkstoff-Oberflächenschädigungen primär durch Kräfte, Spannungen und Deformationen ausgelöst werden, stehen bei den zwei anderen Prozessen die stofflichen Wechselwirkungen in der Kontaktfläche im Vordergrund. Der Prozeß des Adhäsionsverschleißes beruht darauf, daß bei der tribologischen Beanspruchung infolge hoher lokaler Pressungen schützende Ölfilme und Oberflächenschichten durchbrochen werden und adhäsive Bindungen zwischen den Gleitpartnern entstehen, die auch „Mikro-Kaltverschweißungen“ genannt werden. Dieser Vorgang ist in der Technik unter dem Begriff „Fressen“ äußerst gefürchtet. In Bild 3 c ist das Erscheinungsbild einer Gleitfläche nach dem Versagen durch Fressen wiedergegeben. Es handelt sich hier um den einen Partner eines Stahl-Stahl-Gleitsystems, wobei der Zwischenstoff ein reines paraffinbasiertes Mineralöl war. Man erkennt deutlich die adhäsiv übertragenen, quasi „aufgeschweißten“ Materialpartikel aus dem Gegenpartner.

Auch beim letzten der Hauptverschleißmechanismen, der Tribooxidation, ergeben sich die Materialschädigungen im wesentlichen durch stoffliche Wechselwirkungen der am Verschleißvorgang beteiligten Partner unter den tribologischen Beanspruchungen. Hierbei reagieren die beanspruchten, durch die Reibung aktivierten Werkstoff-Oberflächen mit dem Umgebungsmedium mit dem Resultat, daß ständig neue Reaktionsprodukte erzeugt und abgerieben werden. In Bild 3 d ist ein Beispiel tribochemisch gebildeter Reaktionsprodukte dargestellt. Entstehen diese Reaktionsprodukte unter einer tribologischen Oszillationsbeanspruchung, so spricht man auch von Reibkorrosion oder Passungsrost.

Die einzelnen Verschleißmechanismen können bei einem praktischen Verschleißproblem – je nach Werkstoffkombination, Geometrie und Beanspruchungsbedingungen – einzeln auftreten, einander überlagert sein oder sich auch einander ablösen.

6. Ordnungsfragen

Die Komplexheit der Verschleißvorgänge und die Vielfalt der zu berücksichtigenden Einflußgrößen macht eine sinnvolle Ordnung des Verschleißgebietes notwendig. Dazu wurde von Siebel 1938 auf der Verschleißtagung des VDI in Stuttgart folgende Klassifikation gegeben [24], die auf den äußeren Bedingungen des Verschleißangriffs aufbaut.

1. Verschleiß bei gleitender Reibung zwischen trockenen Flächen.
2. Verschleiß bei gleitender Reibung zwischen geschmierten Flächen.
3. Verschleiß bei rollender Reibung zwischen trockenen Flächen.
4. Verschleiß bei rollender Reibung zwischen geschmierten Flächen.
5. Verschleiß bei Berührung unter Wechselbeanspruchung.
6. Verschleiß durch bewegte feste Verschleißmittel (Erosion).
7. Verschleiß durch bewegte Flüssigkeiten (Kavitation).

Ende der 40er und Anfang der 50er Jahre ging man unter Federführung von Wahl, dem damaligen Obmann des Ausschusses „Verschleißfragen“ im Fachnormenausschuß Materialprüfung, an die Erarbeitung eines anderen Ordnungsschemas heran, indem man fünf für einen Verschleißvorgang wichtige Punkte herausstellte:

- | | | |
|--|---|-------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> a) Grundkörper b) Gegenstoff c) Zwischenstoff d) Bewegung e) Belastung | } | Verschleißpaarung |
|--|---|-------------------|

Darauf baute die Vornorm DIN 50321 von 1953 auf.

In den letzten Jahren wurde die in den 60er Jahren zur Bearbeitung von komplexen Sachverhalten entwickelte allgemeine Methodik der Systemanalyse in die Tribologie eingeführt [38] und als Grundlage zur Neugestaltung der Norm DIN 50320 benutzt. In *Bild 4* ist die Anwendung der Methoden der Systemanalyse bei der Untersuchung des Verschleißes in einem tribotechnischen System, einem Getriebe, in stark vereinfachter Form erläutert.

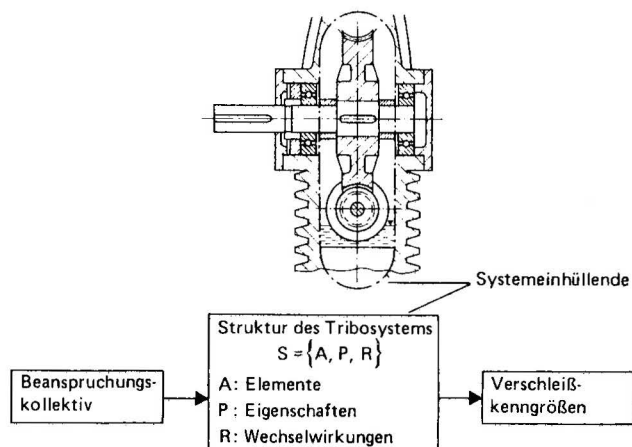


Bild 4
Systemanalyse eines tribotechnischen Systems

Zur Systemanalyse eines Verschleißvorganges werden die am Verschleiß unmittelbar beteiligten stofflichen Partner durch eine für den jeweiligen tribologischen Beanspruchungsfall geeignet zu wählende „Systemeinhüllende“ von der Außenwelt gedanklich abgegrenzt. Die innerhalb der Systemeinhüllenden liegenden stofflichen Partner werden als „Elemente“ des Tribosystems bezeichnet; sie charakterisieren zusammen mit ihren tribologisch wichtigen „Eigenschaften“ und „Wechselwirkungen“ die „Struktur des Tribosystems“. Die auf die Elemente des Tribosystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen bilden das „Beanspruchungskollektiv“. Der beim Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Struktur des Tribosystems auftretende Verschleiß wird durch „Verschleiß-Kenngrößen“ beschrieben.

Die Systemanalyse eines Verschleißvorganges umfaßt damit die folgenden Schritte:

- I Kennzeichnung der technischen Funktion des Tribosystems
- II Angabe des Beanspruchungskollektivs
- III Kennzeichnung der Struktur des Tribosystems durch
 - a) die am Verschleiß beteiligten Elemente
 - b) die relevanten Eigenschaften der Elemente
 - c) die Wechselwirkungen der Elemente
- IV Angabe von Verschleißkenngrößen

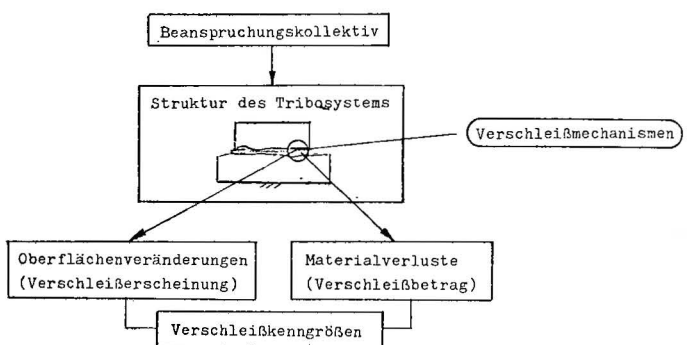


Bild 5
Verschleiß als Kenngröße eines tribologischen Systems

Die Systemanalyse eines Verschleißvorganges zeigt, daß, wie in *Bild 5* dargestellt, der in einem tribologischen System auftretende Verschleiß sich durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Systemstruktur ergibt und durch „systemspezifische“ Verschleißkenngrößen zu beschreiben ist. In symbolischer Form gilt somit:

$$\text{Verschleißkenngröße} = f(\text{Beanspruchungskollektiv, Systemstruktur})$$

Für die praktische Durchführung der Systemanalyse eines Verschleißvorganges ist ein Datenblatt entwickelt worden [38], das dem Norm-Entwurf von DIN 50 320 „Verschleiß“ als Anhang beigelegt ist.

Mit den Methoden der Systemanalyse ist nunmehr auch eine genauere Gliederung des Verschleißgebietes möglich. In den vorhergehenden Abschnitten sind bereits zwei unterschiedliche Verschleiß-Klassifikationsmöglichkeiten erwähnt worden:

- (a) Klassifikation nach der Art der äußeren Beanspruchung (Siebel 1938)

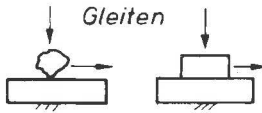
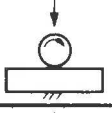
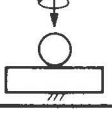
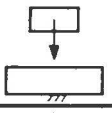
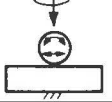
Verschleißpaarung	Tribologische Beanspruchung (Symbole)	Verschleißart	Verschleißerscheinungsform bei Wirkung des Verschleißmechanismus:				
			Adhäsion	Abrasion	Oberfl.-zerrüttung	Tribochem. Reaktionen	Tribo-sublimation
Festkörper-Festkörper (ohne oder mit Schmierung)	Gleiten 	Gleitverschleiß	Löcher Kuppen Schuppen	Kratzer Riefen	Risse	Kuppen (Partikel)	Löcher Mulden
	Rollen Wälzen 	Rollverschleiß Wälzverschleiß	Löcher	Kratzer	Risse Mulden (Pittings)	Kuppen (Partikel)	—
	Bohren 	Bohrverschleiß	Löcher Kuppen Schuppen	Kratzer Riefen	Risse	Kuppen (Partikel)	—
	Prallen Stoßen 	Stoßverschleiß	Löcher	Kratzer	Mulden (Grübchen)	Kuppen (Partikel)	Löcher
	Oszillieren 	Schwingungsverschleiß	Gekoppelte Wirkung der Verschleißmechanismen; dadurch: Löcher, Risse, Kuppen (Partikel) Kratzer, Riefen				—

Bild 6
Klassifizierung des Festkörper-Festkörper-Verschleißes

(b) Klassifikation nach den wirkenden Verschleißmechanismen (Burwell 1957)

Wie die Systembetrachtungen erkennen lassen, müssen für die Gliederung des Verschleißgebietes die beiden Klassifikationen (a) und (b) zusammengefaßt und durch die Angabe von Verschleißkenngrößen (wie z. B. der Erscheinungsform von Verschleißflächen) ergänzt werden. Die resultierende Gliederung für die Fälle des Festkörperverschleißes ist in Bild 6 wiedergegeben. Damit können die Ordnungsprobleme als weitgehend gelöst angesehen werden.

7. Ausblick

Wie bereits einleitend erwähnt, entstehen der deutschen Volkswirtschaft durch Verschleiß jährlich Verluste in Höhe von mehreren Milliarden DM. Hierauf weist der jüngst erschienene Forschungsbericht Tribologie hin, der im Auftrage des Bundesministeriums für Forschung und Technologie in Zusammenarbeit von Industrie und Forschungsinstituten erarbeitet wurde [39]. Dieser Forschungsbericht soll als Grundlage für ein neues Programm zur finanziellen Förderung vor allem der praxisnahen Triboforschung dienen.

Bezeichnet man mit Pfänder die Wissenschaft als die Einheit von Forschung, Lehre und Erfahrung, so ist in diesen drei Bereichen auf dem Verschleißgebiet noch eine Reihe von Aufgaben zu bearbeiten.

In der Verschleißforschung ist an erster Stelle die Aufklärung der für den Verschleiß wichtigen Oberflächeneigenschaften von Werkstoffen zu nennen, weil in diesen die Verschleißprozesse wirksam sind. Hier ist zu erwarten, daß mit Hilfe der seit kurzem zur Verfügung stehenden Oberflächenanalysen-Verfahren wie Auger, SIMS, ESCA, LEED u. a. neue Erkenntnisse gewonnen werden können [40]. Weiter-

hin ist eine versetzungstheoretische Deutung der Bildung und des Wachstums von Rissen im Hinblick auf die Entstehung von Verschleißpartikeln notwendig. Die „delimitation theory“ von Suh bietet hierzu einen Ansatz [41].

Im Bereich der Verschleißlehre besteht in Deutschland im Vergleich zu den angelsächsischen Ländern ein Rückstand. So fehlen Lehrstühle für Tribologie, die das vorhandene Wissen an Studenten weitergeben können, um dadurch Mißerfolgen und Schäden in der Praxis frühzeitig vorzubeugen. Es muß allerdings auf einigen Gebieten noch um eine einheitliche Lehrmeinung gerungen werden. Hier hat sich die allmählich angenommene Erkenntnis, daß im wesentlichen vier grundlegende Mechanismen für den Verschleiß verantwortlich sind, als fruchtbar erwiesen.

Da wegen der Komplexheit der Verschleißprozesse häufig Probleme auftreten, die sich vor allem mit Hilfe langjähriger Erfahrung lösen lassen, sollte ein ständiger Gedankenaustausch zwischen Praktikern und Forschern stattfinden. Dadurch könnten die für einen konkreten Fall erforderlichen und erfolgreichen Maßnahmen wissenschaftlich begründet, soweit wie möglich auf eine allgemeinere Grundlage gestellt und damit auch für andere Fälle nutzbar gemacht werden.

Literatur

- [1] Kirschke, K., H. Czichos, K.-H. Habig, P. Studt: Tribologie; Forschungsbericht zum Schwerpunktprogramm Verschleiß, Reibung, Schmierung. Wiesbaden: Fr. Steiner Verlag, 1971
- [2] Göttner, G.: Tribologie – Begriff, Wesen und Bedeutung. Schmiertechnik u. Tribologie, 17 (1970), S. 285
- [3] Jost, P.: Some Economic Factors of Tribology. Proc. JSLE-ASLE Internat. Lubr. Conf. (Editor:

- T. Sakurai)
Amsterdam: Elsevier, 1976, S. 2
- [4] Vogelpohl, G.:
Die Reibung ausreichend geschmierter Maschinenteile im Hinblick auf eine rationelle Energiewirtschaft. Stahl u. Eisen, 70 (1950), Nr. 21, S. 930
- [5] Department of Education and Science: Tribology (Lubrication, Friction and Wear), A Report on Present Position and Industry's Needs. London: Her Majesty's Stationery Office, 1966
- [6] Reynolds, O.:
On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. Phil. Trans., 177 (1886), S. 157
- [7] Stribeck, R.:
Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. VDI-Z., 46 (1902), S. 1341, 1432, 1463
- [8] Vogelpohl, G.:
Die Stribeck-Kurve als Kennzeichen des allgemeinen Reibungsverhaltens geschmierter Gleitflächen. VDI-Z., 96 (1954), S. 261
- [9] Sommerfeld, A.:
Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung. Z. Math. Phys., 50 (1904), S. 97
- [10] Gümbel, L.:
Der Einfluß der Schmierung auf die Konstruktion. Jb. schiffbautechn. Ges., 18 (1917), S. 299
- [11] Falz, E.:
Grundzüge der Schmierungstechnik. Berlin: Springer-Verlag, 1926
- [12] Vogelpohl, G.:
Betriebssichere Gleitlager. Berlin: Springer-Verlag, 1958
- [13] zitiert in: Cameron, A.:
The principles of lubrication. London: Longmans, 1966, S. 203
- [14] Dowson, D., and G. R. Higginson:
New roller-bearing lubrication formula. Engineering, London, 192 (1961), S. 158
- [15] Tallian, T. E.:
The theory of partial elastohydrodynamic contacts. Wear, 21 (1972), S. 49
- [16] Czichos, H.:
Influence of asperity contact conditions on the failure of sliding elastohydrodynamic contacts. Wear, 41 (1977), S. 1
- [17] Møllgaard, J.:
Die Entwicklung von Verschleißprozessen. Schmiertechnik + Tribologie 23 (1976) S. 162
- [18] Fuchsel, M.:
Über Verschleißbarkeit der Werkstoffe bei trockener Reibung. Organ f. d. Fortschritt d. Eisenbahnwesens, 84 (1929), S. 413
- [19] Fink, M., u. U. Hofmann:
Zur Theorie der Reiboxydation. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, 6 (1932), S. 161
- [20] Mailänder, R., u. K. Dies:
Beitrag zur Erforschung der Vorgänge beim Verschleiß. Techn. Mitt. Krupp Forschungsber., 5 (1942), S. 209
- [21] Holm, R.:
Die Reibungskraft in der wahren Kontaktfläche. Wiss. Veröff. Siemens Werke, 17 (1938), S. 38
- [22] Bowden, F. P., and D. Tabor:
The theory of metallic friction and the role of bearing and ploughing. Council Sci. and Ind. Res. Comm. of Australia, Bulletin 145, 1942
- [23] Ulrich, M.:
Zur Frage der Grübchenbildung bei Zahnrädern. VDI-Z., 78 (1934), Nr. 2, S. 53
- Niemann, G.:
Walzenfestigkeit und Grübchenbildung von Zahnrad- und Wälzlager-Werkstoffen. VDI-Zeitschrift, 87 (1943), S. 521
- [24] Siebel, E.:
Über die praktische Bewährung der mit Verschleißversuchen gewonnenen Ergebnisse. Tagungsband, VDI-Verschleiß-Tagung, Stuttgart, 1938, S. 4
- [25] I - Ming Feng:
Metal transfer and wear. J. Appl. Phys., 23 (1952), S. 1011
- [26] Kerridge, M.:
Metal transfer and the wear process. Proc. Phys. Soc., B., London, 68 (1956), S. 400
- [27] Kerridge, M., and I. K. Lancaster:
The stages in a process of severe metallic wear. Proc. Roy. Soc. London, A. 236 (1956), S. 250
- [28] Wellinger, K., u. H. Uetz:
Gleitverschleiß, Spülverschleiß, Strahlverschleiß unter Wirkung von körnigen Stoffen. VDI-Forschungsheft, 449, Beilage zu Forsch. Ing. Wes. 21. (1955), S. 1
- [29] Khrushov, M. M.:
Resistance of metals to wear by abrasion; related to hardness. Proc. Conf. Lubr. and Wear, Instn. Mech. Engrs. London, 1957, S. 655
- [30] Burwell, J. T.:
Survey of possible wear mechanisms. Wear, 1 (1957), S. 119
- [31] Augustin, U., u. M. Pfender:
Rahmenplan für DFG-Schwerpunktprogramm „Grundlagenforschung Verschleiß, Reibung und Schmierung“. Berlin: Bundesanstalt f. Materialprüfung (BAM), Nov. 1961

- [32] DOKUMENTATION TRIBOLOGIE – Verschleiß, Reibung und Schmierung. 11 Bände, 1967 – 1974
Herausgegeben von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Fachgruppe Rheologie u. Tribologie, D - 1000 Berlin 45
- [33] Habig, K.-H.:
Der Einsatz des Raster-Elektronenmikroskops zur Aufklärung von Verschleißmechanismen.
Beitr. elektr. Direktabb. Oberfl. 3 (1970), S. 235
- [34] Habig, K.-H., K. Kirschke, W. Maennig u. H. Tischer:
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 Torr und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr.
Berlin: BAM-Bericht Nr. 13, 1972, u. Wear 22 (1972), S. 373
- [35] Habig, K.-H.:
Die Verschleißmechanismen von Metallen und Maßnahmen zu ihrer Bekämpfung.
Z. f. Werkstofftechnik 4 (1973), S. 33
- [36] Czichos, H., u. K.-H. Habig:
Grundvorgänge des Verschleißes metallischer Werkstoffe – Neuere Ergebnisse der Forschung.
VDI-Berichte Nr. 194, 1973, S. 23
- [37] Schouten, M. J. W.:
Der Einfluß elasto-hydrodynamischer Schmierung auf Reibung, Verschleiß und Lebensdauer von Getrieben.
Schmiertechnik u. Tribologie, 20 (1973), S. 147
- [38] Czichos, H.:
Systemanalyse und Physik tribologischer Vorgänge. Teil 1: Grundlagen; Teil 2: Anwendungen.
Schmiertechnik u. Tribologie, 22 (1975), Nr. 6, S. 126 und 23 (1976), Nr. 1, S. 6
- [39] BMFT Forschungsbericht T 76 - 38:
Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung.
Juli 1976, 280 Seiten
- [40] Czichos, H.:
Meßtechnische Methoden zur Untersuchung tribologisch beanspruchter Werkstoffoberflächen.
Schmiertechnik u. Tribologie, 21 (1974), Nr. 2, S. 25
- [41] Suh, N. P.:
The delamination theory of wear.
Wear, 25 (1973), S. 111

Einsatz der elektrochemisch-potentiostatischen Konzentrationsmessung in Kernkraftwerken

Von Reg.Dir. Dr.-Ing. Günter Teske, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

DK 543.37 : 543.25 : 621.039.577 : 621.187.11

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr.3 S. 179/184

Manuskript-Eingang 25. Mai 1977

Inhaltsangabe:

Die Entwicklungsstufen der Meßanordnungen zur elektrochemischen Konzentrationsmessung von Sauerstoff (O_2), Hydrazin (N_2H_4) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) im Speisewasser werden in ihrer historischen Folge von der ersten einfachen Meßzelle bis zur komplexen Meßanordnung für Kernkraftwerke nachgezeichnet. Aufbau und Funktion des für die besonderen Bedingungen des Druckwasserreaktors konstruierten Analysators werden beschrieben. Bei Siedewasserreaktoren lassen sich die Messungen mit dem Analysator für konventionelle Wärmekraftwerke durchführen. Die H_2O_2 -Messung kann bei der neutralen Fahrweise Bedeutung erlangen. Ein tragbares Analysengerät für die o.g. Stoffe hat sich für kurzfristige (Punkt-) Messungen auch in Kernkraftwerken bewährt.

Meßanordnungen – Analysator für Druckwasserreaktor

Herrn Professor Dr.-Ing. Max Pfender zur Vollendung seines 70. Lebensjahres gewidmet

Vorwort

Die vielfältigen und bedeutenden Leistungen, die die Bundesanstalt für Materialprüfung durch die Arbeit ihrer Abteilungen "2 Bauwesen" und "6 Stoffartunabhängige Verfahren" für die Betriebssicherheit von Kernkraftwerken erbringt [1;2], werden durch ein analytisches Verfahren ergänzt, das von F. Tödt [3] begründet wurde und vom Laboratorium "5.34 Elektrochemische Meßverfahren und Schadstoff-Analytik" weiterentwickelt und betreut wird. Der erfolgreiche Entwicklungsgang dieses für die verschiedensten Aufgabenstellungen der Forschung und Industrie nutzbar gemachten Meßverfahrens wurde ermöglicht durch den Weitblick und die Aufgeschlossenheit des langjährigen ehemaligen Präsidenten der Bundesanstalt für Materialprüfung, Prof. Dr.-Ing. Max Pfender. Er nahm 1950 unter kritischen Umständen Prof. Tödt und die kleine Gruppe seiner Mitarbeiter in das damalige Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem

auf und ließ dieser Arbeitsrichtung Wohlwollen und Förderung angedeihen.

Dieser Bericht über den Verlauf der Entwicklung von der ersten einfachen Meßzelle bis zur komplexen Meßanordnung für die extremen Bedingungen eines Kernkraftwerkes ist daher vom Verfasser, der sich seit jener Zeit u.a. mit dieser Aufgabe befaßte, in besonderer Dankbarkeit und Verehrung Herrn Professor Dr.-Ing. Max Pfender zum 70. Geburtstag gewidmet.

1. Bedeutung der Kesselspeisewasserkontrolle für den Kraftwerksbetrieb

Das Betriebsmittel Wasser bzw. Wasserdampf ist in den bisher gebauten Leistungs-Kernkraftwerken ebenso wie in den konventionellen Wärmekraftwerken notwendiger Energieüberträger zwischen Wärmequelle und Turbinenaggregat. Bei den durch möglichst hohen Wärmenutzungsgrad gegebenen Betriebsbedingungen – Druck bis zu 200 bar, Temperatur bis zu 800 Kelvin – bilden gelöste Bestandteile des Wassers,

vornehmlich Sauerstoff und Chlorionen, eine latente Gefahr für die Stabilität der Anlagen durch die Korrosion der Werkstoffe. Diese läßt sich nicht allein durch die hochgezüchtete Qualität der verwendeten Stähle und NE-Metalle vermeiden. So ist ein entscheidender Faktor für die Gewährleistung der Betriebssicherheit und unbeeinträchtigten Leistungsfähigkeit eines Kraftwerkes die sorgfältige Aufbereitung des Kesselspeisewassers durch Vollentsalzung, Entgasung und zweckmäßige Konditionierung. Die erforderliche Wirksamkeit dieser Maßnahmen muß durch eine hochentwickelte, zuverlässige, automatische Meß- und Analysetechnik ständig bzw. registrierend überwacht werden. Die erhöhten Sicherheitsanforderungen für den Betrieb von Kernreaktoren machen diese Aufgabe noch verantwortungsvoller und durch spezielle Bedingungen komplizierter.

Bei der bisher fast stets angewendeten alkalischen Fahrweise des Kesselspeisewassers bei oben genannten Bedingungen muß nach der Betriebsvorschrift gemäß den Richtlinien der "Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber – VGB" [4] die Sauerstoffkonzentration unter $20 \mu\text{g/l}$, das sind 22 ppb bzw. 2 g O_2 in 100 t Wasser, durch die physikalische (thermische) und chemische Entgasung gehalten werden. Diese Konzentration muß zumindest vor dem Eintritt in den Kessel bzw. Wärmetauscher kontrolliert werden; eine Überwachung des Turbinencondensates, des Speisewasserbehälters und hinter dem (thermischen) Entgaser läßt Undichtigkeiten gegenüber der Luft und damit Gefahrenquellen erkennen, deren Beseitigung aus Sicherheitsgründen ebenso notwendig ist wie zur Rationalisierung der Entgasungsmaßnahmen. Die chemische Entgasung wird fast überall durch eine Dosierung von Hydrazinlösung in das Speisewasser vorgenommen, wobei folgende Reaktion ausgenutzt wird:



Zur rationellen Dosierung des Hydrazins, dessen Verbrauch einen nicht unerheblichen Betriebskostenpunkt bildet, ist eine laufende automatische Kontrolle und damit auch Regelmöglichkeit von Nutzen.

Für diese beiden Aufgaben der Sauerstoffspurenmessung im Bereich $0 \dots 20 \mu\text{g/l}$ und der Hydrazinkontrolle im Bereich $0 \dots 100$ bzw. $0 \dots 500 \mu\text{g/l}$ stehen automatische, kontinuierlich arbeitende Analysatoren u.a. auf der Grundlage der elektrochemischen Konzentrationsmessung zur Verfügung. Dieses vielfach beschriebene [5] Verfahren, das sich hinsichtlich der theoretischen Grundlagen auf die Polarographie zurückführen läßt, zeichnet sich durch seine hohe und stabile Meßempfindlichkeit sowie gute Selektivität aus und ist durch die Möglichkeit, einfach aufgebaute und robuste Meßanordnungen auszuführen, für die rauen Betriebsbedingungen eines Kraftwerkes besonders geeignet. So wurden im Laufe der vergangenen 3 Jahrzehnte in stufenweiser Anpassung an die ständig gesteigerten praktischen Anforderungen an Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Wartungsfreiheit und Flexibilität gegenüber unterschiedlichen Betriebsbedingungen und Verfahrensweisen immer vollkommener Meßanordnungen entwickelt. Dieser Werdegang von einer einfachen Meßzelle bis zum komplexen Analysator für die extremen Bedingungen des Kernkraftwerkes sei hier – nicht zuletzt auch aus Anlaß des 80. Geburtstages, den Prof. Dr.-Ing. Fritz Tödt als Vater des Verfahrens kürzlich feiern konnte – kurz nachgezeichnet.

2. Prinzip und Entwicklungsstufen der Meßanordnungen

Die erste 1948 für Sauerstoffmessungen im Kesselspeisewasser praktisch angewendete Meßzelle nach Tödt und Freier (Bild 1) [6] war eine sog. Elementanordnung. Diese bestand

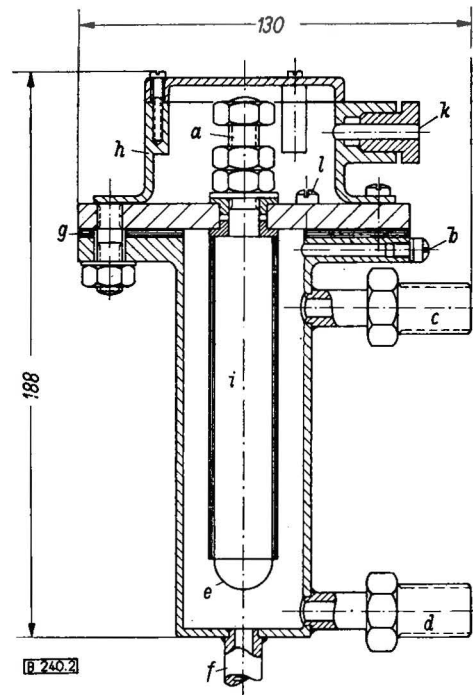
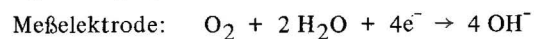


Bild 1
Element-Meßzelle zur Sauerstoffspurenmessung (Schnitt)
a) Kabelanschluß der Meßelektrode, b) Entlüftungsschraube, c) Wasseraustritt, d, f) Wassereintritt, e) Meßelektrode, g) Flanschdichtung, h) Verteilerkappe, i) Isolierschlauch, k) Stopfbuchse für Kabeleinführung, l) Masseanschluß (Eisenelektrode).

im Prinzip aus einem die Gegenelektrode bildenden Eisenrohr mit einem konzentrisch angeordneten Nickelzylinder als Meßelektrode. Die Sauerstoffkonzentration im durch die Zelle fließenden Wasser wird durch Messung des Diffusionsgrenzstromes der kathodischen Sauerstoffreduktion bestimmt, wobei folgende Elektrodenreaktionen ablaufen (Bruttogleichungen):



Der von einem zwischen Meß- und Gegenelektrode eingeschalteten Galvanometer angezeigte Strom ist unter bestimmten Bedingungen linear proportional der Sauerstoffkonzentration: $i_{\text{Grenz}} = K \cdot c_{\text{O}_2}$

Die Elementanordnung wurde auch bei der konstruktiven Änderung (1955) des sog. "Oxyflux"-Gerätes (Bild 2) durch die herstellende Firma beibehalten, jedoch wurde für die Meßelektrode wegen der besseren Eigenschaften bald Silber verwendet; die Gegenelektrode bestand nach wie vor aus den beiden unedlen Metallen Eisen und Zink [7].

Mit der Einführung der Vollentsalzung zur Speisewasseraufbereitung und durch Änderungen der Alkalität kam es zu Passivierungserscheinungen an den Gegenelektroden und Versagen der Meßelemente. Hiergegen brachte 1966 die Einführung des Potentiostaten nach W. Schwarz [8] den entscheidenden Fortschritt für die Zuverlässigkeit und Stabilität der O_2 -Grenzstrommessung. Das für die kathodische O_2 -Reduktion notwendige Potential der Meßelektrode wird

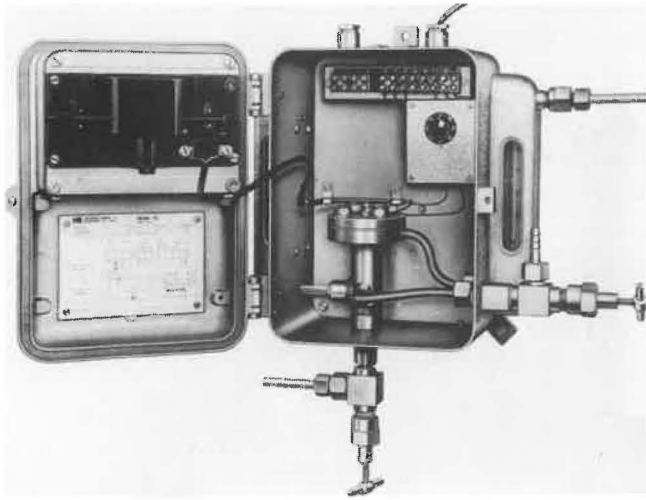


Bild 2
 "Oxyflux" 1955
 (Bauart Hartmann u. Braun AG, Frankfurt/Main).

nun durch Konstanthaltung der Potentialdifferenz gegenüber einer Bezugsselektrode auf elektronischem Wege eingeregelt. Dies ist eine stabile Elektrode 2. Art (Kalomel, Thalamid), die außerhalb der Meßzelle angeordnet und durch einen Elektrolytschlüssel mit Diaphragma mit ihr verbunden ist. Die Gegenelektrode dieser potentiostatischen Anordnung ist in weiten Grenzen ohne Funktionseinfluß und besteht aus Edelstahl. Eine so aufgebaute Rohrmeßzelle (Bild 3) wurde im "Oxyflux 2" (Bild 4) ergänzt durch eine Eichzelle, mit der durch definierte elektrolytische Wasserzersetzung bekannte Sauerstoffkonzentrationen im Meßgut hergestellt werden können. Dadurch ist jederzeit einfach und schnell die automatische Kontrolle und evtl. Korrek-

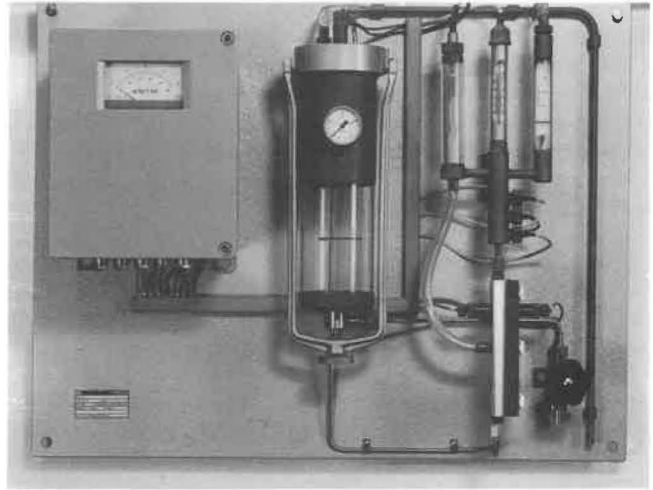
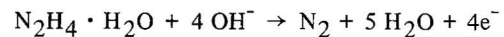


Bild 4
 "Oxyflux 2" 1967
 Werkbild Hartmann & Braun AG

turen der Kalibrierung der Meßanordnung bei direkter Anzeige der O₂-Konzentration möglich. Eine hohe Meßgenauigkeit ist damit stets gewährleistet. Eine Besatzungszelle sorgt für die notwendige Leitfähigkeit [9].

Die Verwendung des Potentiostaten ermöglichte auch auf relativ einfache Weise die Ausdehnung des Meßverfahrens auf die Kontrolle der Hydrazinkonzentration (1968/70). Durch entsprechende Polarisation einer Goldmeßeletrode wird der Diffusionsgrenzstrom der anodischen Oxidation des Hydrazins gemessen:



Im "Oxyflux 3R" wird praktisch die gleiche Meßzelle und -anordnung wie zur Sauerstoffmessung benutzt [10].

Vor drei Jahren erfolgte durch Neukonstruktion die Zusammenfassung aller Bauteile der Meßanordnung in einem Gehäuse ("Oxyflux 3") (Bild 5).

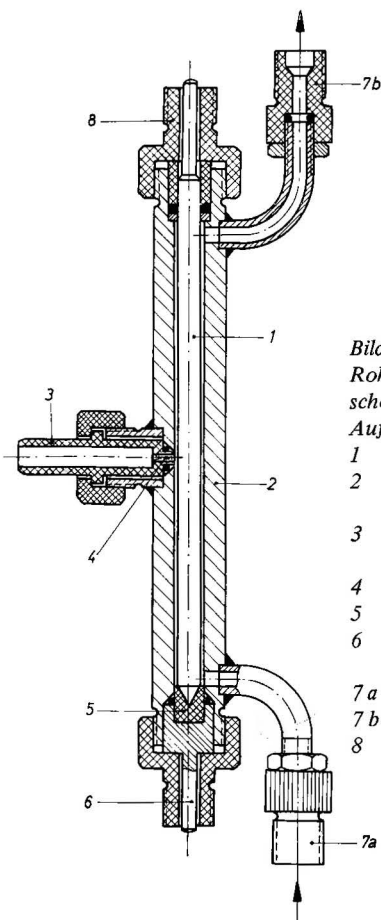


Bild 3
 Rohrmeßzelle zur potentiostatischen Konzentrationsmessung, Aufbau im Schnitt.
 1 Silber-Meßeletrode
 2 Edelstahlrohr als Gegenelektrode
 3 Anschlußstutzen für die Bezugsselektrode
 4 Diaphragma
 5 isolierendes Lager
 6 Kontakt der Gegenelektrode
 7 a Meßgutzufluß
 7 b Meßgutabfluß
 8 Kontakt der Meßeletrode



Bild 5
 "Oxyflux 3" 1975 auf dem Prüfstand der BAM
 (Hersteller Dr. Thiedig + Co., Berlin).

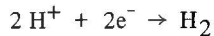
3. Meßanordnungen für Kernkraftwerke

3.1 Verwendung am Druckwasser-Reaktor

Diese Meßanordnungen hatten sich bereits langjährig in zahlreichen Kraftwerken bewährt, als 1971 die besonderen Betriebsbedingungen des Druckwasserreaktors im Kernkraftwerk Stade weitere Entwicklungsschritte erforderlich

machte, um auch hier zu einer exakten und sicheren Sauerstoffspurenmessung zu kommen. Das Wasser des Primärkreislaufes ist mit Wasserstoff unter einem Druck von 4 - 5 bar gesättigt. Das Meßgut kann hier nicht, wie sonst üblich, vor der Meßzelle auf Umgebungsdruck entspannt werden, ohne daß eine Entgasung unter undefinierter Änderung der Sauerstoffkonzentration erfolgen würde. Die Messung muß also unter dem angegebenen Druck durchgeführt werden.

Ferner war zu berücksichtigen, daß das Meßgut eine wenn auch normalerweise geringe Radioaktivität aufweist. Daher mußte der analytische Teil mit der Meßzelle in einer Bleibox abgeschirmt und indirekt bedienbar installiert werden können. Der Meßgutverbrauch war soweit wie möglich zur Minderung der Kontaminierung und des aufzuarbeitenden Wasservolumens zu reduzieren und wurde auf einen Durchsatz von 5 l/h festgesetzt. Da das Primärwasser zu Beginn einer Fahrperiode ("Reise") durch Borsäure einen pH-Wert von etwa 4,5 besitzt, der im Laufe der Betriebszeit auf 7 ansteigt, mußte die Einstellung der Referenzspannung für den Potentiostaten so geändert werden, daß eine Überlagerung des Sauerstoff-Diffusionsgrenzstromes durch die kathodische Reaktion der Wasserstoffionen-Entladung



ausgeschlossen war.

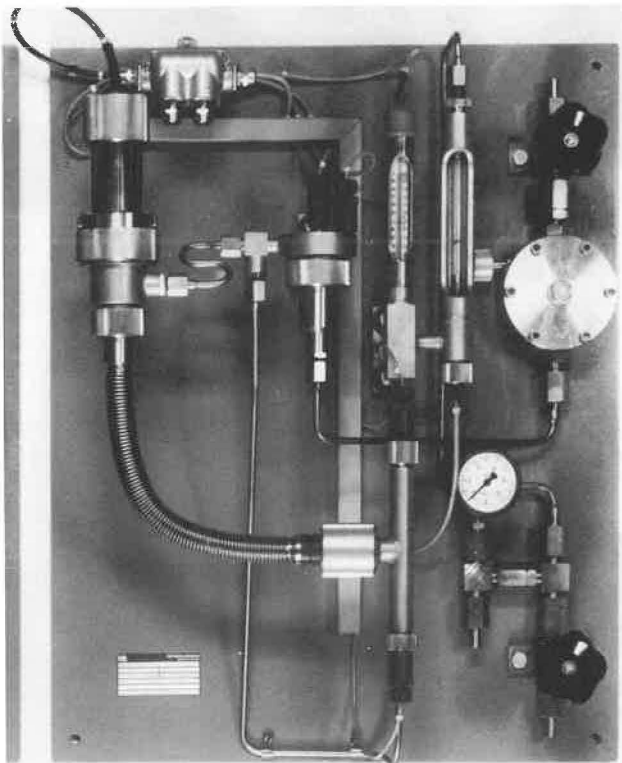


Bild 6
"Oxyflux KKWP" zur Sauerstoff- und Hydrazinmessung im Primärwasserkreislauf von Druckwasserreaktoren.

Diese Forderungen wurden durch die Entwicklung des "Oxyflux KKWP" (Bild 6) erfüllt, an der das Laboratorium "Elektrochemische Meßverfahren" ebenso wie auch bei den früheren Entwicklungsschritten maßgeblich mitwirkte.

Das Gerät ist zweiteilig und ermöglicht, daß das Schaltgerät außerhalb der Bleibox leicht zugänglich und bedienbar angebracht werden kann. Der Abstand zur Analysortafel kann ohne weiteres bis zu 10 m betragen.

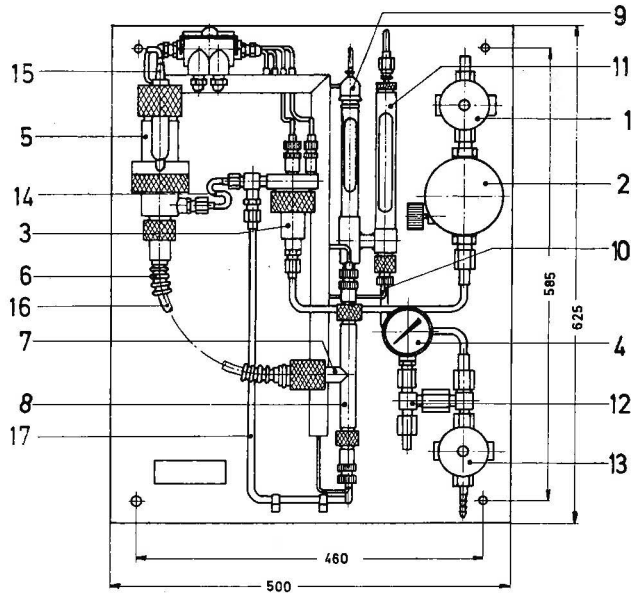


Bild 7
Einzelteil-Übersicht zum "Oxyflux KKWP"

Alle vom Meßgut durchflossenen Teile und belasteten Verschraubungen des Analysators (Bild 7), die auf der Tafel übersichtlich und gut zugänglich angeordnet sind, mußten entsprechend dem Meßgutdruck von 5 bar zuzüglich eines Sicherheitszuschlages verstärkt ausgelegt werden. Bei der Meßzelle (8)* selbst, die schon in der Ausführung für den "Oxyflux 3" mit einem massiven Silberstab als Meßelektrode hohen Belastungen standhält, waren nur relativ geringfügige Änderungen vorzunehmen. So ergaben sich an diesem für die Messung entscheidenden Bauteil grundsätzlich keine Funktionsrisiken durch Neuerungen.

Der Einfluß des Meßgutdruckes auf das Diaphragma (7) als kritischer Teil der Verbindung zwischen Meßzelle und Bezugselektrode (15) mußte jedoch besonders berücksichtigt werden. Diese befindet sich ja in einem eigenen Gefäß (5) und ist mit der Meßzelle durch einen als Elektrolytschlüssel dienenden, mit Kaliumchlorid-Lösung gefüllten Schlauch (16) verbunden. Am Diaphragma in der Meßzelle muß von vornherein ein Druckgefälle ausgeschlossen werden, um eine Unterbrechung der elektrolytischen Verbindung zur Bezugselektrode und damit den Ausfall der potentiostatischen Regelung zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde der Verbindungsschlauch mit einem Mantel in Form eines Faltenbalges (6) umgeben. Der Zwischenraum ist mit Meßgut gefüllt und steht durch eine Querleitung (14) mit der Meßgutleitung (17) vor der Meßzelle in Verbindung. Der Druck des Meßgutes wirkt somit auch auf die elastische Schlauchleitung und über deren Flüssigkeitsfüllung auf das "äußere" Ende des Diaphragmas (7). So herrscht gegenüber seinem "inneren" Ende Druckgleichgewicht, das sich auch bei Druckänderungen praktisch ohne Verzögerungen einstellt. Selbstverständlich mußte auch das Bezugselektrodengefäß druckfest armiert werden.

Die Eichzelle ist gegenüber dem Oxyflux 3 ein separates, druckfest ausgeführtes Teil, da eine Besalzungszelle nicht erforderlich ist. Die Leitfähigkeit im Primärwasser ist ausreichend hoch und konstant.

Das Meßgut wird dem Analysator über ein Absperrventil (1)

*) In Klammern stehende Ziffern = Positionen im Bild 7

zugeführt. Ein Differenzdruckregler(2) sorgt für den konstanten Meßgutfluß von 5 l/h. Durch eine Edelstahl-Rohrleitung gelangt es dann zur Eichzelle (3) in der Mitte der Tafel. An ihrem Ausgang zweigt die Querverbindung (14) zum Bezugselektrodengefäß (5) bzw. Faltenbalg (6) ab. Eine weitere Edelstahl-Rohrleitung führt zur Meßzelle (8) unten in der Mitte der Tafel. Von hier fließt das Meßgut zum Thermometer (9) mit Temperaturfühler zur Kompensation des Temperaturgradienten des Meßeffectes (10) und weiter zum Durchflußmesser (11). Nachdem eine Verzweigung (12) zu einem Sicherheitsventil und Manometer (4) passiert wurde, fließt das Meßgut über das Druckhalteventil (13) in die Rückführ- bzw. Abwassersammelleitung. Am Schaltgerät können die zwei Meßbereiche 0 ... 20 $\mu\text{g O}_2/\text{l H}_2\text{O}$ und 0 ... 100 $\mu\text{g/l H}_2\text{O}$ bzw. ein Übersichtmeßbereich bis ca. 1000 $\mu\text{g/l H}_2\text{O}$ gewählt werden. Die potentiostatische Schaltung kann auch so ausgeführt werden, daß durch einfache Schalterbetätigung statt der O_2 -Messung die N_2H_4 -Messung durchgeführt werden kann. Hierzu ist allerdings noch der Austausch der Silberelektrode gegen die gleichgeformte Goldmeßelektrode und die entsprechende Umkalibrierung notwendig.

Die Erprobung des Prototyps erfolgte im Kernkraftwerk Stade zunächst durch Mitarbeiter der Kraftwerk Union im Zusammenwirken mit dem Laboratorium 5.34 der BAM. Es wurden Funktionskontrollen und -begutachtungen zu meist mit befriedigenden Ergebnissen durchgeführt; ein Teil der gewonnenen Erfahrungen wurde in Konstruktionsverbesserungen umgesetzt.

Nach Übernahme der Anlage durch die Kernkraftwerks-gesellschaft wurde die Zusammenarbeit mit Erfahrungsaus-tausch fortgesetzt. Ein abschließender Erfahrungsbericht wurde vom Leiter des Laboratoriums im KKW Stade auf der "Speisewassertagung 1975" der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber erstattet. In diesem Bericht wurde die zweijährige Bewährung des "Oxyflux KKWP" durch einwandfreie, zuverlässige betriebssichere und wartungsarme Funktion und Erfüllung der vom Kernkraftwerks-betrieb erhobenen Forderungen festgestellt [11].

Inzwischen wurden weitere Kernkraftwerke im In- und Aus-land mit dem Oxyflux KKWP ausgerüstet; teilweise wurden diese schon in Betrieb genommen.

3.2 Meßanordnung für Siedewasserreaktoren

Auch für die Überwachung der "einkreisigen" Wasserfüh-rung bei Siedewasserreaktoren kommt das obige Verfahren zum Einsatz. Da hier eine Messung unter Druck nicht er-forderlich ist, wird der "Oxyflux 3" in fast unveränderter Ausführung verwendet. Es hat sich jedoch als zweckmäßig herausgestellt, den sonst üblichen Durchflußkonstanthalter nach dem Überlaufprinzip zwecks Meßgutersparnis (Kon-taminationsgefahr!) durch den beim Oxyflux KKWP be-nutzten Differenzdruck-Regler zu ersetzen.

Im Siedewasserreaktor ist auf Grund der Radiolyse mit er-höhten Sauerstoffkonzentrationen zu rechnen. Diese ent-sprechen dann u. U. den Verhältnissen bei der sog. "neutra-len Fahrweise". Zur Zeit sind folgende Meßbereiche vorge-sehen

I : 0 ... 100 $\mu\text{g O}_2/\text{l H}_2\text{O}$

II : 0 ... 500 $\mu\text{g O}_2/\text{l H}_2\text{O}$

Übersichtsbereich : 0 ... ca. 1000 $\mu\text{g O}_2/\text{l H}_2\text{O}$

Die Erfahrungen, die in den letzten Jahren mit dieser neuen Betriebsweise in konventionellen Wärmekraftwerken erhal-ten wurden, können nutzbringend angewendet werden. Bei der neutralen Fahrweise, die in der Zukunft an Bedeutung und Verbreitung gewinnen dürfte, werden beständige Schutzschichten auf den Innenwandungen der Leitungen und Behälter durch einen Sauerstoffpegel um 300 $\mu\text{g O}_2/\text{l H}_2\text{O}$ gebildet und stabil erhalten. Völlige Salzfremheit des Wassers – Leitfähigkeit unter 0,15 $\mu\text{S/cm}$! – muß gegeben sein. Die relativ hohe Sauerstoffkonzentration wird durch Dosierung von Wasserstoffperoxid-Lösungen erreicht. Eine möglichst selektive Messung der H_2O_2 -Konzentration wird hier von Nutzen sein.

Auch diese Meßaufgabe ist mit dem potentiostatischen Ver-fahren gelöst worden. Mit einer kathodisch polarisierten Silbermeßelektrode wird ein Summensignal von O_2 - und H_2O_2 -Konzentration – allerdings wegen unterschiedlicher Stromausbeuten für äquivalente Konzentrationen – in nicht eindeutiger Größe erhalten. Jedoch wird mit einer anodisch polarisierten Goldmeßelektrode selektiv ein nur durch die H_2O_2 -Konzentration bestimmter Strom gemessen. Dazu müssen ähnlich wie bei der anodischen Hydrazinmessung be-stimmte Randbedingungen eingehalten werden. Dann ist es möglich, durch (automatische) Differenzbildung aus katho-dischen und anodischen Meßergebnissen auch die O_2 -Kon-zentration neben der H_2O_2 -Konzentration zu ermitteln. Das wird neben der Kontrolle der Extremwerte für die H_2O_2 -Konzentration an der Dosierstelle bzw. der O_2 -Kon-zentration vor Kesseleintritt dann von Nutzen sein, wenn die H_2O_2 -Zersetzung und -Zehrung auf dem Wege zum Kessel hin aufgeklärt werden sollen.

Da eine Bildung von H_2O_2 u. U. bei Siedewasserreaktoren in Betracht zu ziehen ist bzw. deren Betrieb von der Grund-situation her den Bedingungen der neutralen Fahrweise na-he ist, kann die Anwendung der H_2O_2 -Messung hier glei-chermaßen Bedeutung erlangen.

3.3 Tragbares Meßgerät für (Kern-)Kraftwerke

Untersuchungen zu diesen Problemen werden demnächst "vor Ort" durchgeführt werden. Dabei wird auch ein kürz-lich in die Kraftwerks-Meßtechnik eingeführtes Analysen-gerät herangezogen werden, das sich durch Handlichkeit, netzunabhängige Betriebsweise und flexible Einsatzmöglich-keit zu kurzfristigen (Punkt-)Messungen für alle oben ge-schilderten Meßprobleme auszeichnet [12].

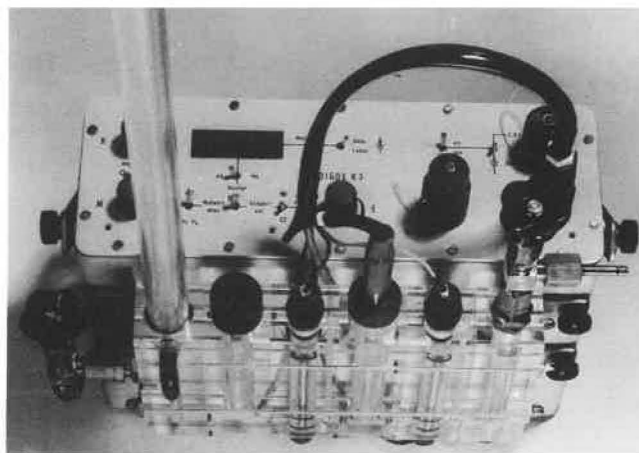


Bild 8
Tragbarer Analysator für Kesselspeisewassermessungen "Digox K-3".
(Hersteller Dr. Thiedig u. Co., Berlin).

Auch dieser tragbare Analysator "Digox K-3" (Bild 8) wurde unter Verwertung der Erfahrungen aus vielfältigen Messungen im Kesselspeisewasser im Laboratorium "Elektrochemische Meßverfahren und Schadstoff-Analytik" der Bundesanstalt für Materialprüfung entwickelt und unter dessen Mitwirkung langfristig und erfolgreich erprobt. Sauerstoffmessungen können im Bereich 0 ... 1000 µg/l mit flexibler elektrolytischer Kalibriermöglichkeit zwischen 20 und 1000 µg/l durchgeführt werden, ebenso Hydrazin- bzw. H₂O₂-Messungen. Eine Umschaltung auf den Meßbereich 0 ... 10 mg/l ist für alle 3 Komponenten möglich. Für beide Bereiche gibt es einen Ausgang für Registriergeräte (0 ... 20 mA). Mehrere Geräte haben sich bereits in Kernkraftwerken bewährt.

4. Schlußbemerkung zur Entwicklungsarbeit an den Meßanordnungen

Die Arbeit des Laboratoriums 5.34 der Bundesanstalt für Materialprüfung ist nicht nur auf die Entwicklung von Verfahren und Meßanordnung, wie vorstehend in Beispielen geschildert, ausgerichtet. Vielmehr bestehen enge Verbindungen zur Praxis der Kraftwerke durch weitere Aufgaben. Diese sind:

1. Durchführung gütesichernder, serienmäßiger Funktionsprüfungen aller in den konventionellen und Kernkraftwerken zum Einsatz kommenden elektrochemisch-potentiostatischen Analysatoren (Oxyflux 3, Oxyflux 3R, Oxyflux KKWP, Digox K-3).
2. Begutachtung installierter Meßanlagen "vor Ort" unter Betriebsbedingungen mit Überprüfung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit.
3. Beratung bei der Projektierung neuer Meßanlagen

Erst die aus diesen Tätigkeiten gewonnenen praktischen Erfahrungen und die Berücksichtigung von Anregungen aus den Betrieben ermöglichen die erfolgreiche und praxisnahe Weiter- und Neuentwicklung von Meßverfahren und -anordnungen für die Untersuchung des Wassers. Die Wahrnehmung dieser Aufgaben dient dem Ziel, die Sicherheit und Effektivität der Kraftwerke, insbesondere auch der Kernkraftwerke auf dem Gebiete der Überwachung des Speisewassers zu gewährleisten.

Literatur

- [1] Matthees, W.
Dynamic Analysis of Structural Systems with Internal Gaps under Axial Loading.
Transactions of 3rd Int. Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, London 1975
- [2] Wüstenberg, H., u. E. Mundry
Bedeutung und Praxis der zerstörungsfreien Prüfung beim Bau und bei der Überwachung von Kernkraftwerken.
BAM-Amts- und Mitteilungsblatt 5 (1975) Nr. 3, S. 103

- [3] Tödt, F.
Z. Ver. dtsh. Zuckerind. 79 (1929) 680
- [4] Neue Richtlinien für das Kesselspeisewasser und das Kesselwasser von Dampferzeugern.
VGB Kraftwerkstechnik, 52. Jg. (1972), Heft 2, 167 - 172
- [5] Tödt, F.
Elektrochemische Sauerstoffmessung.
Verlag W. de Gruyter + Co., Berlin 1958
- [6] Freier, R., Tödt, F., Wickert, K.:
Selbstschreibende Sauerstoff-Meßanlage zur Sauerstoff-Bestimmung im Wasser, insbesondere für Hochdruckkraftwerke.
Chemie-Ingenieur-Technik 13 (1951) 325 - 327
- [7] Tödt, F.
Erfahrungen mit den in den letzten Jahren entwickelten Apparaturen zur elektrochemischen Sauerstoffmessung in Flüssigkeiten.
Chemiker-Zeitung, Chemische Apparatur 83 (1959) Nr. 14, 483 - 490
- [8] Schwarz, W.
Der Potentiostat als Hilfsmittel für Polarographie und Amperometrie.
Chemie-Ingenieur-Technik 6 (1956) 423.
Ferner DBP 1.002.144
- [9] Teske, G.
Neue automatische Meßanordnung zur Kontrolle oxydierender und reduzierender Stoffe in Lösungen, insbesondere von Spurenkonzentrationen in Kesselspeisewässern.
Dechema-Monographien, Band 67 (1971) Teil 1
- [10] Teske, G.
Elektrochemisches Meßverfahren zur Kontrolle der Hydrazinkonzentration im Kesselspeisewasser und im Heizungswasser.
VGB Kraftwerkstechnik, Sonderheft VGB-Speisewasertagung 1971
- [11] Brunner, R.
Chemische Betriebserfahrungen im Kraftwerk Stade während der ersten drei Betriebszyklen
VGB Kraftwerkstechnik, 56. Jg. (1976), Heft 2, 90 - 100
- [12] Teske, G.
Schadstoffkontrolle und industrielle Konzentrationsmessungen mit neuen potentiostatischen Meßanordnungen.
Dechema-Monographien, Band 8, Teil 2 (1976) 727 - 736

Neue elektrochemische Untersuchungen zur Nachverdichtungsgüte von anodisiertem Aluminium

W. Paatsch

Metall 31, 3 (1977), S. 260-263

Das langfristig einwandfreie Verhalten von anodisch oxidiertem Aluminium kann nur erreicht werden, wenn die Oxidschichtdicke und der Verdichtungsgrad bestimmte Mindestwerte nicht unterschreiten. Diese Werte sind nach Möglichkeit zerstörungsfrei und schnell zu messen. Während das bei der Schichtdickenmessung ohne Probleme möglich ist, werden diese Forderungen im Falle des Nachverdichtungsgrades nicht von den chemischen, sondern nur von den elektrischen Meßmethoden, z.Z. allein von der Impedanzmessung erfüllt. In der vorliegenden Arbeit wurde daher untersucht, ob weitere elektrische Eigenschaften der Oxidschichten prinzipiell zur Beurteilung des Verdichtungsgrades herangezogen werden können. Die potentiostatische, stationäre Untersuchung der anodischen Sperrströme in Borsäure ergab, daß diese zumindest im Dickenbereich zwischen 5 und etwa 15 µm bei Verdichtungszeiten bis zu 3 min/µm als Meßgröße geeignet sind. Demgegenüber stellten sich galvanostatische, anodische Ein- und Ausschaltkurven aus Gründen einer zu geringen Meßsicherheit als nicht geeignet heraus. Der zeitliche Stromanstieg beim Nachanodisieren der Oxidschichten ist zwar prinzipiell als Meßgröße geeignet, jedoch sind die für technisch verwendbare Schichten auftretenden Zeiten zu groß. Darüber hinaus ist das zuletzt genannte Verfahren nicht mehr als zerstörungsfrei zu bezeichnen.

Untersuchungen zum Korrosionsschutz durch im Vakuum aufgedampfte Aluminiumschichten

W. Paatsch

Aluminium 53, 3 (1976), S. 254-256

Das Aufdampfen von Aluminium im Vakuum auf Stahl-Grundmaterial führt zu einem Verbundwerkstoff mit guten mechanischen Eigenschaften und hoher thermischer Belastbarkeit. Elektrochemische Versuche lassen den Schluß zu, daß Aluminiumüberzüge zum Ersatz von Zinnschichten in der Füllgüterindustrie geeignet sind. Die Anfälligkeit der Lochfraßkorrosion erfordert jedoch hier zusätzliche Schutzmaßnahmen etwa in Form von Lackfilmen. Korrosionstests in künstlichen Klimaten und unter Freiluftbedingungen geben Aufschlüsse über Grenzen und Einsatzmöglichkeiten von aluminiumbedampftem Stahlblech.

Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Flammensperren mit Bandsicherungen bei einem Nachbrennen an/in der flammenlöschenden Schicht

D. Lietze

Die Berufsgenossenschaft, November 1976, S. 435-438

Zur Absicherung von Anlagen oder Anlagenteilen, in denen reaktionsfähige Gasphasen gehandhabt werden, verwendet man heute vielfach Flammensperren mit einer flammenlöschenden Schicht aus sogenannten Bandsicherungen. In der Bundesanstalt für Materialprüfung sind in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Grenze der Flammendurchschlagsicherheit derartiger Flammensperren bei der Reaktion von Gemischen der Systeme „Wasserstoff/Sauerstoff/Stickstoff“, „Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff“ und „Propan/Sauerstoff/Stickstoff“ ausgeführt worden. Dabei wurden für jedes reaktionsfähige System je-

weils zwei Grenzen für die Flammendurchschlagsicherheit derartiger Flammensperren ermittelt: Die Bedingungen, bei denen es beim ersten Einlaufen einer als Deflagration oder als Detonation ankommenden Reaktion sofort zu einem Flammendurchschlag kommt und die Bedingungen, bei denen es bei einem Nachbrennen von strömendem Gemisch zu einer im Inneren der flammenlöschenden Schicht stehenden Flamme mit einem dadurch bedingten Flammendurchschlag kommt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Form von Diagrammen zusammengefaßt. Mit Hilfe dieser Diagramme kann die Wirksamkeit von Flammensperren mit Bandsicherungen in den drei hier untersuchten reaktionsfähigen Systemen sicherheitstechnisch beurteilt werden. Für andere reaktionsfähige Systeme kann die Grenze der Wirksamkeit dieser Flammensperren mit Hilfe der aus der Literatur bekannten „Grenzspaltweiten“ zumindest näherungsweise abgeschätzt werden.

Anomale Diffusion in Reaktionsharzen

J. Sickfeld

Colloid + Polymer Sci. 62, (1977), S. 117-124

Durch Vergleich der Längen- und Dickenänderungskurven bei der Quellung normal vernetzter EP-Harze in stark polaren Medien konnte bewiesen werden, daß die „Anomalität“ gravimetrischer Quellungskurven darauf zurückzuführen ist, daß die Quellung erst eindimensional als Dickenänderung erfolgt, wobei sich in den gequollenen Oberflächen- und Zwischenschichten Druckspannungen aufbauen, die in einem bestimmten Stadium das Reißen des weniger gequollenen, harten Filmkerns zur Folge haben. Erst danach findet eine spontane Längenänderung statt. In weichgemachten oder untervernetzten Filmen, deren Glasumwandlungsbereich sich im Bereich der Raumtemperatur oder darunter befindet, können sich Druckspannungen in der beschriebenen Weise nicht oder nicht so stark aufbauen; derartige Filme verhalten sich daher relativ „normal“, d.h. dem \sqrt{t} -Gesetz der Diffusion entsprechend. Gleiches gilt für normal vernetzte EP-Harzfilme, bei denen durch Vorquellung der Filmkern irreversibel verändert wurde. Die Ergebnisse erscheinen aus einem praktischen Gesichtspunkt heraus von Bedeutung, weil Anomalität im Quellverhalten als gleichbedeutend mit Unbeständigkeit einer Beschichtung mit dem entsprechenden Reaktionsharz gegenüber der Einwirkung des betreffenden Mediums anzusehen ist.

Eignungsprüfung von Gaswarngeräten

G. Heinsohn

Referat anlässlich der Tagung des Ausschusses „Analysegeräte“ in der „Normenarbeitsgemeinschaft für Meß- und Regeltechnik in der chemischen Industrie“ (NAMUR) am 13.5.1977 im Hause der Siemens AG in Karlsruhe

Der Einsatz von Gaswarngeräten im primären Explosionsschutz setzt die Eignungsprüfung des Gerätes und ein entsprechendes anerkanntes Gutachten voraus, in dem sicherheitstechnische Kennwerte und die Einsatzfähigkeit bescheinigt werden. Hier wird über in der Prüfpraxis gemessene Kennwerte und ihre sicherheitstechnische Auswertung, insbesondere hinsichtlich der Einsatzplanung im Rahmen von Sicherheitssystemen berichtet. Informationen über Antragstellung, Art und Anzahl der Prüfungsunterlagen, Durchführung der Untersuchungen, ferner Art und Inhalt des Gutachtens und Bedingungen für seine Abgabe sind eingeschlossen.

Richtlinien über Anforderungen an Sauerstoff(O₂)-Handmeßgeräte und an tragbare Sauerstoff(O₂)-Meßeinrichtungen für Volumengehalte an O₂ von weniger als 21 % sowie Durchführung der Eignungsuntersuchung
Ausgabe Juni 1977

DK 543.292.1

Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 7 (1977) Nr. 3 S. 186/197

Manuskript-Eingang 11. Juli 1977

Nachfolgend werden die „Richtlinien über Anforderungen an Sauerstoff(O₂)-Handmeßgeräte und an tragbare Sauerstoff(O₂)-Meßeinrichtungen für Volumengehalte an O₂ von weniger als 21 % sowie Durchführung der Eignungsuntersuchung“, Ausgabe Juni 1977 bekannt gemacht.

Die Eignungsprüfungen, die die Bundesanstalt für Materialprüfung zukünftig an Geräten dieser Art durchführt, werden diesen Richtlinien gemäß vorgenommen.

Die Richtlinien sind von einem Arbeitskreis unter Mitwirkung der Bundesanstalt für Materialprüfung, des Landesoberbergamtes NW, des Oberbergamtes für das Saarland und das Land Rheinland-Pfalz sowie der Prüfstelle für Grubenbewetterung der Westfälischen Bergwerkschaftskasse aufgestellt worden.

Gliederung

1. Geltungsbereich

2. Begriffsbestimmung

3. Anforderungen an Sauerstoff(O₂)-Handmeßgeräte und an tragbare Sauerstoff(O₂)-Meßeinrichtungen

3.1. Mechanischer Aufbau

3.2. Gasweg, Durchfluß, Einstellzeit und Probenahmereinrichtung

3.3. Elektrische Anforderungen

3.4. Meßtechnische Anforderungen

3.4.1. Fehlergrenzen

3.4.2. Nullpunkts- und Empfindlichkeitsdrift

3.4.3. Systematische Fehler

3.4.4. Meßunsicherheit

3.5. Anzeigeverhalten

3.6. Kennzeichnung

3.7. Weitere Bestandteile der Meßeinrichtung

4. Eignungsuntersuchung

4.1. Zweck der Eignungsuntersuchung

4.2. Voraussetzungen für die Durchführung der Eignungsuntersuchung

4.3. Durchführung der Eignungsuntersuchung

4.3.1. Prüfung des mechanischen Aufbaus

4.3.2. Prüfung von Gasweg, Durchfluß, Einstellzeit und Probenahmereinrichtung

4.3.3. Prüfung der elektrischen Bauteile

4.3.4. Prüfung der Anzeige und der Empfindlichkeit unter konstanten Bedingungen

4.3.5. Bestimmung der langfristigen Änderung der Anzeige unter konstanten Bedingungen (Nullpunkts- und Empfindlichkeitsdrift)

4.3.6. Prüfung der Nullpunktslage und der Anzeige in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen

4.3.7. Prüfung der Anzeige in Abhängigkeit von der Beströmung des Meßwertgebers

4.3.8. Prüfung des Einflusses von Störgasen und -dämpfen

4.3.9. Prüfung des Einflusses von Staub

4.3.10. Prüfung des Lageeinflusses

4.3.11. Prüfung der Meßunsicherheit

4.3.12. Prüfung des Anzeigeverhaltens

4.3.13. Prüfung der Grenzsinalgabe

4.3.14. Prüfung der Einrichtungen für die Meßwertübertragung

Anhang 1

Übersicht über Größen und Einheiten

Anhang 2

Zusammenstellung der angezogenen Vorschriften und sonstigen Bestimmungen

1. Geltungsbereich

Die vorliegenden Richtlinien erstrecken sich auf O₂-Handmeßgeräte sowie auf tragbare O₂-Meßeinrichtungen (Gasmeß- ggf. -warngeräte einschließlich Zubehör) für Volumengehalte an O₂ von weniger als 21 %, soweit diese Geräte von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) oder einer von

den Oberbergämtern anerkannten Fachstelle *) auf Eignung untersucht werden.

Außer den in diesen Richtlinien getroffenen Festlegungen sind auch sonstige Vorschriften, wie die Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen (Ex V), die bergbehördlichen Verordnungen für elektrische Anlagen (BVOE, BPVE), die Bestimmungen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE), zu beachten.

2. Begriffsbestimmung

In diesen Richtlinien werden u. a. folgende Begriffe verwendet:

O₂-Handmeßgeräte

O₂-Handmeßgeräte sind leichte handliche Gasmeßgeräte und ggf. auch Gaswarngeräte, die von Hand bedient werden können. Sie bestehen insbesondere aus der Meßkammer, der Anzeigeeinrichtung und der netzunabhängigen Stromversorgung in der Regel in einem gemeinsamen Gehäuse einschließlich der Probenahmeeinrichtung.

Tragbare O₂-Meßeinrichtungen

Tragbare O₂-Meßeinrichtungen sind selbständig messende, anzeigende, registrierende, warnende und/oder schaltende Einrichtungen, die ortsveränderlich oder auch stationär betrieben werden können.

Im Sinne dieser Richtlinien sind Bestandteile der tragbaren O₂-Meßeinrichtungen insbesondere

- das Meßgerät (im Bergbau grundsätzlich mit Anzeigeeinrichtung), bestehend aus einem oder mehreren ggf. getrennt angeordneten Meßwertgebern (Aufnehmer, Fühler nach VDI/VDE 2600), der zum Betrieb erforderlichen netzunabhängigen Energieversorgung und Hilfsgeräten,
- die Probenahmeeinrichtungen,
- die eingebauten Grenzsinalgeber zur Auslösung von Warnsignalen oder anderen Schaltvorgängen.

Darüber hinaus können Bestandteile sein:

- Schreib- und zusätzliche Anzeigegeräte
- Einrichtungen zur Übertragung des Meßsignals vom Meßgerät über den Signalkanal zu den Anzeige- und Schreibgeräten

Meßgrundlage

Die Meßgrundlage gibt an, nach welchem physikalischen oder physikalisch-chemischen Meßprinzip, z. B. Paramagnetismus, elektrochemische Vorgänge, und nach welchem Meßverfahren, z. B. Vergleichsmeßverfahren, die Meßgröße ermittelt wird (VDI/VDE 2600).

Meßgröße

Je nach Meßprinzip und Meßverfahren kann die Meßgröße, der Volumengehalt an Sauerstoff (O₂-Gehalt) in % O₂, der Partialdruck an Sauerstoff pO₂ in mbar bzw. die Konzentration an Sauerstoff je Volumeneinheit ρO₂ in g/m³ sein.

*) Als Fachstelle ist von den Oberbergämtern die Prüfstelle für Grubenbewetterung der Westfälischen Berggewerkschaftskasse anerkannt.

Meßwertgeber (Aufnehmer, Fühler)

Als Meßwertgeber wird der Teil des O₂-Handmeßgerätes bzw. der tragbaren O₂-Meßeinrichtung bezeichnet, in dem der Meßgröße, der Meßgrundlage entsprechend, ein z. B. elektrischer Meßwert zugeordnet wird.

Gasweg

Als Gasweg der O₂-Handmeßgeräte bzw. der tragbaren O₂-Meßeinrichtungen werden alle Bauteile bezeichnet, die zum Transport der zu messenden Gasprobe in den Meßwertgeber dienen.

Laborbedingungen

Unter Laborbedingungen ist der Klimabereich

Temperatur	291 K	≤ T ± ΔT ≤	298 K
Druck	970 mbar	≤ p ± Δp ≤	1.060 mbar
relative Feuchte	40 %	≤ φ ± Δφ ≤	80 %

zu verstehen.

Die Klimaschwankungen im Verlauf eines Tages dürfen die Werte

$$|\Delta T| \leq |2 \text{ K}|, |\Delta p| \leq |20 \text{ mbar}|, |\Delta \varphi| \leq |10 \%|$$

nicht überschreiten.

Für die Umrechnung der Meßgrößen untereinander gilt bei 273 K und 1.013 mbar:

Ein Volumengehalt an O₂ von 20,93 % entspricht einem Partialdruck des O₂ von 212 mbar und einer Konzentration des Sauerstoffs von 299,1 g/m³.

Standardprüfgase

Luft mit einem Volumengehalt an O₂ von 21 % oder Prüfgas mit einem O₂-Gehalt von etwa 66 % des Meßbereichsendwertes in Stickstoff.

3. Anforderungen an Sauerstoff (O₂)-Handmeßgeräte und an tragbare Sauerstoff (O₂)-Meßeinrichtungen

Die nachstehend festgelegten Anforderungen an O₂-Handmeßgeräte und an tragbare O₂-Meßeinrichtungen sind Mindestanforderungen, die jedoch im Einzelfall für die Verwendung dieser Geräte unter bestimmten Einsatzbedingungen von den untersuchenden oder zulassenden Stellen erweitert werden können.

3.1. Mechanischer Aufbau

O₂-Handmeßgeräte müssen leicht (Richtwert 500 g), in den Abmessungen handlich geformt und bequem zu tragen sein.

Die Masse der tragbaren O₂-Meßeinrichtungen sollte möglichst klein gehalten werden und 5 kg nicht überschreiten.

Die Geräte müssen bestimmten, im Abschnitt Eignungsuntersuchung festgelegten Beanspruchungen durch Erschütterungen, Staub, Feuchtigkeit, aggressive Medien und Temperatur standhalten. Die zur Kalibrierung bzw. zum Abgleich erforderlichen Stellglieder müssen ohne Öffnen des Gehäuses zugänglich sein und dürfen nur mit besonderen Hilfsmitteln verstellt werden können. Anzeigeeinstrumente müssen gut ablesbar sein. Im Bergbau untertage eingesetzte Meßgeräte müssen den O₂-Meßwert am Gerät anzeigen. Bei einer

in % geteilten Skala darf der Anzeigebereich 0 bis 25 % nicht übersteigen.

Bei O₂-Handmeßgeräten ist für den Einsatz im Bergbau eine Einhandbedienung mit entsprechend sinnvoller Anordnung der Bedienungs- und Ableselemente vorzusehen.

Die Geräte müssen so eingerichtet sein, daß auch Messungen an schwer zugänglichen Stellen z. B. mit Hilfe von Sonden einfach vorgenommen werden können.

3.2. Gasweg, Durchfluß, Einstellzeit und Probenahmeeinrichtung

Der Gasweg des O₂-Handmeßgerätes bzw. der tragbaren O₂-Meßeinrichtung einschließlich der unter Umständen zur Funktion erforderlichen Vorlagen und Filter muß dicht sein. Die Einstellzeit t_E *) sollte möglichst kurz sein und 10 Sekunden nicht überschreiten.

Soweit die Verwendung einer Probenahmeeinrichtung, bestehend aus Ansaugleitung bzw. Sonde, zusätzlichen Filtern, Vorlagen zur Ausscheidung von Staub und Wasser, vorgesehen oder erforderlich ist, ist die Pumpenleistung so zu bemessen, daß sich die Einstellzeit t_E der Meßeinrichtung in Abhängigkeit von der Länge der Ansaugleitung bzw. Sonde um höchstens 1,5 s je m Ansaugleitung erhöht.

Der Volumenstrom durch die Meßeinrichtung und die Dichtigkeit des Gasweges müssen überprüfbar sein.

Diffusionsmeßwertgeber müssen eine Einrichtung für die Prüfgasaufgabe (Prüfkopf) besitzen.

3.3. Elektrische Anforderungen

Der elektrische Teil der O₂-Handmeßgeräte und der tragbaren O₂-Meßeinrichtungen muß den einschlägigen VDE-Bestimmungen und je nach Verwendungsbereich auch anderen Vorschriften, z. B. der ExV bzw. den bergbehördlichen Verordnungen für elektrische Anlagen entsprechen. O₂-Meßgeräte, die in der Zone 0 explosionsgefährdeter Bereiche betrieben werden sollen, müssen besonders für den Einsatz in diesem Gefahrenbereich geprüft und zugelassen sein. Meßeinrichtungen, die im Steinkohlenbergbau untertage eingesetzt werden, müssen, soweit es technisch möglich ist, der Zündschutzart „Eigensicherheit“ entsprechen; der an von außen zugänglichen Anschlüssen entnehmbare Strom, z. B. für ein Schreibgerät, darf nicht größer als 25 mA sein.

Bei Einrichtungen zur Übertragung des Meßsignals soll, im Bergbau muß der Sicherheitsgrad C bzw. D nach VDI/VDE 2180 und 3515 bzw. nach dem Bergbau-Betriebsblatt 22444, Blatt 2, eingehalten sein.

Stellglieder müssen so gewählt werden, daß sich die notwendigen Einstellungen auch nach längerer Betriebszeit stetig, sprunghaft und hinreichend genau erreichen lassen. Der Nullpunkt des Meßgerätes muß sich um etwa 60 % vom Meßbereichsendwert und die Anzeige um etwa 60 % vom Sollwert verstellen lassen.

*) VDI 2449, Blatt 1: Einstellzeit t_E ist die Zeitspanne vom Durchgang eines der vollen Skalenlänge entsprechenden Konzentrationsprunges durch den Eingangsstutzen des Gerätes bis zum Erreichen von 90 % des Anzeige-Sollwertes (90 %-Zeit).

Materialien, Bauteile und Baugruppen müssen nach den Regeln der Technik den Anforderungen des vorgesehenen Verwendungszweckes genügen und die erforderliche Betriebssicherheit gewährleisten. Baugruppen müssen leicht austauschbar sein. Die Bauteile sollten durch im vorgesehenen Verwendungsbereich auftretende schädliche Gase und Dämpfe und dürfen durch klimatische Einflüsse nicht beeinträchtigt werden.

Soweit zum Betrieb der Geräte Hilfsenergie erforderlich ist, muß die verwendete Stromquelle, ggf. mit Spannungsregelung, bei kontinuierlich messenden Geräten so ausgelegt sein, daß mit ihr im neuwertigen Zustand 24 Stunden nach der Vollaumladung eine ununterbrochene Betriebszeit von mindestens zehn Stunden möglich ist. Im festgelegten Entladebereich der Stromquelle müssen die zulässigen Fehlergrenzen eingehalten werden. Die Spannung der Stromquelle muß überprüfbar sein.

Bei tragbaren O₂-Meßgeräten muß das Unterschreiten der festgelegten Mindestspannung durch ein einstellbares Warnsignal angezeigt werden, danach muß das Gerät bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung mindestens 15 Minuten betrieben werden können. Wiederaufladbare Stromquellen sollen gegen Überladung weitgehend unempfindlich sein. Unabhängig von dieser Forderung sollen auch die Ladegeräte zum Aufladen der Akkumulatoren so beschaffen sein, daß eine Überladung selbsttätig vermieden und das Ende des Ladevorganges angezeigt wird.

3.4. Meßtechnische Anforderungen

Die Meßgeräte sollen kontinuierlich messen. Bei intermittierend messenden Einrichtungen muß die Meßfolge den Überwachungsaufgaben angepaßt werden können und der Meßvorgang erkennbar sein.

3.4.1. Fehlergrenzen

Die Fehlergrenzen (DIN 1319) eines O₂-Meßgerätes umfassen systematische und zufällige Fehler, bedingt durch den Einfluß von Druck, Temperatur, Feuchte, Lage des Meßwertgebers, Störgasen und -dämpfen, elektrischen Fehlern, Abweichung der Prüfkurve von der Skalierung, den Ablesefehlern, Fehlern des Meßinstrumentes und Fehlern durch mechanische Beanspruchung der Geräte.

Unter Laborbedingungen darf die Summe aller dieser Fehler innerhalb des festgelegten Entladebereichs der ggf. erforderlichen Stromquelle ± 2 % vom Meßbereichsendwert nicht überschreiten.

Bei Meßgeräten mit mehreren Anzeigebereichen muß der jeweils eingeschaltete Bereich unverwechselbar deutlich gekennzeichnet sein. Der Meßbereichsumschalter darf im Bergbau nur mit besonderen Hilfsmitteln betätigt werden können, wenn Anschlüsse für ein Schreibgerät vorhanden sind. Digitale Anzeige der Meßwerte ist zulässig.

3.4.2. Nullpunkts- und Anzeigedrift

Die Nullpunkts- und Anzeigedrift im Dauerbetrieb unter Laborbedingungen darf nicht größer als 5 % vom Meßbereichsendwert je Woche sein.

3.4.3. Systematische Fehler

Im vorgesehenen Verwendungsbereich mögliche systematische Fehler,

- die durch Dichteänderungen des Gases verursacht werden und somit hauptsächlich von Druck und Temperatur abhängig sind, dürfen nicht größer werden, als es der prozentualen Dichteänderung entspricht;
- die durch Änderungen der Temperatur und der Feuchte verursacht werden, müssen kleiner als $\pm 5\%$ vom Meßbereichsendwert sein,
- die durch Änderung der Beströmung des Meßwertgebers hervorgerufen werden, müssen kleiner als die unter 3.4.1. festgelegten Fehlergrenzen sein,
- die durch Störgase und -dämpfe bzw. durch Staub im Verwendungsbereich hervorgerufen werden, sollen innerhalb der unter 3.4.1. festgelegten Fehlergrenzen liegen,
- die durch die Abweichung der Lage des Gerätes von der Gebrauchslage hervorgerufen werden, müssen kleiner als die unter 3.4.1. festgelegten Fehlergrenzen sein.

3.4.4. Meßunsicherheit

Die Meßunsicherheit nach DIN 1319 umfaßt die zufälligen Fehler aller Einzelvariablen sowie zusätzlich nicht erfaßte, weil nicht meßbare und daher nur abschätzbare systematische Fehler. Die Meßunsicherheit soll mit einer statistischen Sicherheit von 95 % kleiner als 25 % des durch die Fehlergrenzen gegebenen Bereichs sein.

Die von der O₂-Messung unabhängigen Anzeigefehler der Meßinstrumente sollen kleiner sein als ein Viertel der unter 3.4.1. festgelegten Fehlergrenzen. Die Meßinstrumente müssen eine Klassengüte von 2,5 oder besser besitzen (VDE 0410). Die Skalenlänge l_S der Anzeigeeinstrumente soll bei tragbaren Geräten in allen Meßbereichen etwa 60 mm betragen. Der Teilstrichabstand muß bei allen Geräten für 1 Vol.-% O₂ bzw. 10 mbar O₂ Partialdruck mindestens 1,5 mm betragen.

Bei Strichskalen müssen die Ziffern immer gut lesbar sein und dürfen nicht durch den Zeiger verdeckt werden.

3.5. Anzeigeverhalten

Anzeige und ggf. Aufzeichnung der Meßwerte müssen eindeutig sein. Diese Forderung ist erfüllt, wenn nur der vorhandene Volumengehalt an O₂ innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen angezeigt und ggf. aufgezeichnet wird und eine Fehldeutung nicht möglich ist. Auch Warnsignale und sonstige Schaltvorgänge müssen eindeutig ausgelöst werden.

3.6. Kennzeichnung

Die O₂-Meßgeräte müssen als elektrische Betriebsmittel nach den einschlägigen VDE-Bestimmungen, erforderlichenfalls der ExV bzw. den entsprechenden bergbehördlichen Vorschriften für elektrische Anlagen gekennzeichnet sein und außerdem die Prüfnummer der die Eignungsuntersuchung durchführenden Stelle (BAM 4-.../.. bzw. PfG) sowie weitere Angaben über Art und Bereich der Verwendung, insbesondere einen Vermerk über die Einsatzbegrenzung bis zu einem Volumengehalt an O₂ von 21 % tragen.

3.7. Weitere Bestandteile der Meßeinrichtung

Grenzsignalegeber müssen bei Erreichen der vorgegebenen Grenzwerte und bei Störungen selbsttätig und unverzögert Schaltvorgänge auslösen.

Die durch Einrichtungen für die Meßwertübertragung entstehenden zusätzlichen Fehler müssen innerhalb der für das Meßgerät festgelegten Fehlergrenzen liegen.

Werden Schreibgeräte verwendet, so müssen diese eine Klassengüte von 1,5 oder besser aufweisen (VDE 0410) und eine Skalenlänge l_S von mindestens 60 mm sowie eine Vorschubgeschwindigkeit von mindestens 20 mm/h besitzen.

4. Eignungsuntersuchung

4.1. Zweck der Eignungsuntersuchung

Durch die Eignungsuntersuchung wird festgestellt, ob das Gerät den unter Abschnitt 3 der Richtlinien genannten Anforderungen genügt. Von den folgenden Prüfbedingungen kann dann abgewichen werden, wenn dieses sicherheitstechnisch oder von der Meßgrundlage her notwendig ist.

4.2. Voraussetzungen für die Durchführung der Eignungsuntersuchung

Die Eignungsuntersuchungen werden auf schriftlichen Antrag (Auftrag) durchgeführt.

Dem Antrag (Auftrag) sind folgende durch rechtsgültige Unterzeichnung bestätigte Unterlagen beizufügen:

- Zeichnungen des mechanischen Aufbaus und der elektrischen Schaltung
- Beschreibung der Meßgrundlage und der Wirkungsweise
- Betriebs- und Wartungsanleitung
- Erforderlichenfalls sonstige Bescheinigungen, z. B. über Explosions- bzw. Schlagwetterschutz

Es sind drei Prüflinge bereitzustellen, von denen mindestens ein Prüfling bei der prüfenden Stelle als Belegmuster verbleibt. Bei sehr unterschiedlichen Prüfergebnissen kann die Bereitstellung weiterer Prüflinge erforderlich sein.

4.3. Durchführung der Eignungsuntersuchung

Nachstehend werden die Einzelprüfungen in Anlehnung an DIN 40046 nach folgendem Schema beschrieben:

Zweck der Prüfung
 Vorbehandlung und Anfangsmessungen
 Beanspruchung bzw. Hauptmessung
 Nachbehandlung
 Endmessung
 Ergebnisse und Beurteilung
 Einzelbestimmungen

Vor bzw. nach verschiedenen Einzelprüfungen ist zur Feststellung der Betriebsbereitschaft des Prüflings folgende Funktionsprüfung durchzuführen.

Funktionsprüfung:

Prüfung der Stromquelle, des Gasweges, der Nullpunktlage und der Anzeige mit Standardprüfgas.

Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem angegebenen Sollzustand.

Sollzustand: Dichtigkeit des Gasweges

Betriebsbereitschaft aller Bauteile des Gerätes

Zulässige Abweichungen (Fehler) der Anzeige: $\pm 2\%$ vom Meßbereichsendwert

geräte)
gut tragbar (für tragbare O₂-Meßeinrichtungen)

Handhabung: einfach

4.3.1. Prüfung des mechanischen Aufbaus (zu 3.1.)

Zweck der Prüfung: Feststellung der mechanischen Beanspruchbarkeit und der Zweckmäßigkeit der mechanischen Ausführung.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Feststellung der Abmessungen Länge, Breite, Höhe in mm und der Masse m in kg.

Besichtigung hinsichtlich Form, Prüfung der Handhabung, der Wartungs- und Reparaturmöglichkeiten, der Sicherheit gegen falsche Bedienung und Falschmessung, der Anschlußmöglichkeit von Sonden.

Prüfung „Frei-fallen“ nach DIN 40046, Blatt 7 und Blatt 100
Schärfegrad: Fallhöhen 250 mm auf Hartholz

Bei O₂-Handmeßgeräten zusätzlich Fallhöhe 500 mm.

Prüfung „Schwingen“ nach DIN 40046, Blatt 8

Schärfegrad: Beschleunigung etwa 100 m/s²
Frequenz durchlaufend 1 bis 10 Hz oder 5 bis 55 Hz, etwa 90 min lang je Achse

Endmessung: Funktionsprüfung

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

Einzelbestimmungen: Sollzustand
 $m < 500$ g für O₂-Handmeßgeräte
 $m < 5$ kg für tragbare O₂-Meßeinrichtungen

Prüfung „Frei-fallen“: Bei 250 mm Fallhöhe dürfen keine Beschädigungen auftreten.

Bei 500 mm Fallhöhe dürfen an den O₂-Handmeßgeräten nur leichte mechanische Beschädigungen, wie Haarrisse, auftreten.

Prüfung „Schwingen“: Die Abweichungen der Anzeige bei der Endmessung müssen innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen liegen. Sichtbare mechanische Beschädigungen dürfen nicht auftreten.

Form: handlich (für O₂-Handmeß-

Wartung und Reparaturen müssen in einfacher Weise durchgeführt werden können. Ausreichende Sicherheit gegen falsche Handhabung und Falschmessungen muß vorhanden sein. An die Meßgeräte müssen Sonden anschließbar sein.

4.3.2. Prüfung von Gasweg, Durchfluß, Einstellzeit und Probenahmeeinrichtung (zu 3.2.)

Gasweg, Durchfluß, Einstellzeit

Zweck der Prüfung: Bestimmung der Einstellzeit und der Kennwerte des Gasweges.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Prüfung der Dichtheit des Gasweges
Prüfung des Volumenstromes \dot{V}_B bei mittlerer Batteriespannung U_B.

Prüfung der Einstellzeit t_E durch plötzliches Aufgeben des Standardprüfgases. Die Prüfung ist ohne und mit Sorptionsvorlagen und Ansaugschlauch vorzunehmen.

Prüfung der Einrichtungen zur Prüfgasaufgabe an Diffusionsmeßgeräten.

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Sollwerte
Bei verschlossenem Gas-Ansaugstutzen des Meßgerätes muß der Volumenstrom \dot{V} durch den Meßwertgeber auf den Wert Null zurückgehen.

Einstellzeit t_E maximal 10 s ohne Ansaugschlauch bei dem vom Hersteller angegebenen Betriebswert des Volumenstromes \dot{V}_B .

Einstellzeit t_E bei Diffusionsgeräten nicht über 10 s.

Bei Aufgabe des Prüfgases über die Prüfeinrichtung der Diffusionsmeßgeräte muß die Anzeige bei dem vom Hersteller angegebenen Volumenstrom \dot{V}_B innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen liegen.

Probenahmeeinrichtung

Zweck der Prüfung: Prüfung der Eignung von Ansaugfiltern und ggf. Vorlagen, z. B. zur Ausscheidung von Staub und Wasser, sowie Prüfung der Pumpenleistung bei längerer Ansaugleitung.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Prüfung der Eignung und der Funktion von Ansaugfiltern und ggf. Vorlagen, z. B. zur Ausscheidung von Staub und Wasser.
Prüfung der Einstellzeit t_E in Abhängigkeit von der Länge der Ansaugleitung.

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Sollwerte
Ansaugfilter und Vorlagen müssen so bemessen sein, daß die Funktion des Gerätes und die Messung z. B. durch Staub und Wasser nicht beeinträchtigt werden. Die Einstellzeit t_E der Meßeinrichtung darf durch die Länge der Ansaugleitung maximal um 1,5 s je m der Ansaugleitung erhöht werden.

Prüfung der Spannungsanzeige U_S und ggf. der Auslösung eines Warnsignals bei Unterschreiten der Entladegrenze sowie des Verhaltens der Stellglieder zu Beginn und am Ende der Eignungsuntersuchung.

Prüfung klimatischer Einflüsse nach DIN 40046, Blatt 5, Schärfeegrad 7 oder DIN 40046, Blatt 6, Kurzprüfung Schärfeegrad 6, dabei Spülung des Gasweges mit Luft. Die relative Feuchte des Prüfgases und der Luft sollten weitgehend übereinstimmen. Prüfung der Einwirkung schädlicher Gase und Dämpfe in Anlehnung an DIN 40046, Blatt 11.

Endmessung: Funktionsprüfung nach jeder Einzelprüfung.

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

4.3.3. Prüfung der elektrischen Bauteile (zu 3.3.)

Zweck der Prüfung: Feststellung, inwieweit die meßtechnischen Eigenschaften des Prüflings von der Auslegung und Anordnung der elektrischen Bauteile, insbesondere von der eingebauten Stromquelle abhängig sind.

Feststellung der Einwirkung des Klimas und der schädlichen Gase und Dämpfe, die im Verwendungsbereich auftreten können, auf die Bauteile des Meßgerätes.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Verwendung einer neuwertigen Stromquelle, Volladung, Kontrolle des Ladezustandes nach 24stündiger Lagerung, Funktionsprüfung.

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Prüfung der Kapazität der Stromquelle durch Bestimmung der Betriebszeit mit Standardprüfgas bis zum Erreichen der vom Gerät angezeigten Entladegrenze. Beurteilung der Alterung der Stromquelle.

Prüfung der Einstellung der Entladegrenze durch Bestimmung der Betriebszeit, die nach dem Erreichen dieser Entladegrenze bis zum Erreichen der Entladeschlußspannung möglich ist.

Bei intermittierend messenden Geräten Prüfung der Kapazität der Stromquelle durch Bestimmung der Zahl n_M der Messungen (Intervall 3 min) mit Standardprüfgas bis zum Erreichen der vom Gerät angezeigten Entladegrenze.

Prüfung der Einstellung der Entladegrenze durch Bestimmung der Zahl n_E der Messungen, die nach dem Erreichen dieser Entladegrenze bis zum Erreichen der Entladeschlußspannung durchgeführt werden können.

Prüfung der Spannungs- bzw. Stromregelung in Abhängigkeit von der Batteriespannung und der Temperatur durch Bestimmung der maximalen Abweichungen der Anzeige Δc_A vom Sollwert mit Standardprüfgas.

Einzelbestimmungen: Sollzustand

Nach der klimatischen Beanspruchung und nach der Einwirkung schädlicher Gase und Dämpfe dürfen bei der Funktionsprüfung keine Mängel auftreten.

Beurteilung der Korrosionswirkung.

Betriebszeit bis zur Entladegrenze mit der eingebauten neuwertigen Stromquelle mindestens 10 Stunden, nach Erreichen der Entladegrenze mindestens 15 Minuten.

Sollwerte

Bei intermittierend messenden Geräten

$$n_M \geq 200$$

$$n_E \geq 15$$

Prüfung der Spannungsregelung in Abhängigkeit von der Betriebsspannung bei den im Verwendungsbereich vorgesehenen Temperaturen:

$$|\Delta c_A| \leq 1 \% \text{ vom Sollwert}$$

Prüfung der Stellglieder:

Sprungfreie Einstellung der Anzeige bei Betätigung der Stellglieder.

Stellbereich der Nulleinstellung mindestens 60 % vom Meßbereichsendwert.

Stellbereich der Empfindlichkeitseinstellung mindestens 60 % vom Sollwert.

Nullpunkts- und Empfindlichkeitseinstellung sollten sich gegenseitig nicht beeinflussen.

4.3.4. Prüfung der Anzeige und der Empfindlichkeit unter konstanten Bedingungen (zu 3.4.1.)

Zweck der Prüfung: Feststellung der Empfindlichkeit und der Abweichung der angezeigten Meßwerte von den Sollwerten in den Meßbereichen des Prüflings (Aufnahme der Prüfkurve).

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Aufgabe von Prüfgasen mit mindestens vier verschiedenen O₂-Konzentrationen sowie von Luft mit einem Volumengehalt an O₂ von 21 %, Bestimmung der Anzeige und der Nullpunktlage, Untersuchung unter Laborbedingungen bei

konstanter Versorgungsspannung

$$U_B \text{ mit } \left| \frac{\Delta U_B}{U_B} \right| \leq 0,01$$

und konstantem Volumenstrom

$$\dot{V} \text{ mit } \left| \frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}} \right| \leq 0,05$$

Bestimmung der Empfindlichkeit

$$E_L = \frac{\Delta I}{\Delta c} = \frac{\text{Anzeigeänderung in Längeneinheiten}}{\text{Änderung des O}_2\text{-Gehaltes}}$$

oder

$$E_U = \frac{\Delta U_M}{\Delta c} = \frac{\text{Änderung des Meßsignals}}{\text{Änderung des O}_2\text{-Gehaltes}}$$

in Abhängigkeit vom O₂-Gehalt in den Meßbereichen.

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen aufgeführten Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Prüfgaszusammensetzung: Sauerstoffgehalt etwa 10, 25, 50 und 80 % vom Meßbereichsendwert sowie Luft mit 21 % O₂

Sollwerte

$$|\Delta c_N|, |\Delta c_A| \leq 2\% \text{ vom Meßbereichsendwert in Anzeigebereichen bis } 25\% \text{ O}_2$$

$$\Delta c_A = c_A - c$$

c_A vom Prüfling angezeigter O₂-Gehalt bei Aufgabe von Prüfgas mit der Konzentration c (% O₂)

4.3.5. Bestimmung der langfristigen Änderung der Anzeige unter konstanten Bedingungen (Nullpunkts- und Anzeigedrift zu 3.4.2.)

Zweck der Prüfung: Feststellung der langfristigen Abweichungen der Anzeige, der Nullpunktlage bzw. der Empfindlichkeit vom Sollwert in Abhängigkeit von der Betriebszeit bzw. der Zahl der Messungen (Anzeigedrift).

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung mit Nachstellen der Nullpunktlage und Prüfgasanzeige.

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Bestimmung der langfristigen Drift von Nullpunktlage und Prüfgasanzeige bei konstanter Betriebsspannung U_B unter

Laborbedingungen durch Aufgeben von Frischluft mit einem Volumengehalt an O₂ von 21 % mindestens während eines Monats bzw. über 10.000 Messungen (Meßfolge 3 min), Registrierung der Meßwerte und Bestimmung der mittleren Drift der Nullpunktlage Δc_N bzw. der Prüfgasanzeige Δc_A je Woche.

Bestimmung der Lebensdauer von Sauerstoff-Meßzellen, bei denen durch die O₂-Messung ein allmählicher Verbrauch der Meßzelle auftritt.

Endmessung: Funktionsprüfung, Prüfung des Anzeigeverhaltens nach 4.3.12.

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen aufgeführten Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Während der Prüfdauer soll Luft mit einem Volumengehalt an O₂ von 21 % aufgegeben werden.

Bei Versuchsbeginn und nach einem Monat Prüfdauer Prüfung des Anzeigeverhaltens nach 4.3.12.

Sollwerte

$$|\Delta c_A| \leq 5\% \text{ vom Meßbereichsendwert je Woche}$$

O₂-Meßzellen, die einer allmählichen Alterung unterworfen sind, sollen mindestens ein Jahr betriebsbereit sein und den O₂-Gehalt innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen anzeigen.

Nach Abschluß der Laboruntersuchungen soll eine Prüfung unter Betriebsbedingungen über einen Zeitraum von mindestens drei Monaten durchgeführt werden, um auch die langfristige Drift von Nullpunktlage und Anzeige unter Einsatzbedingungen zu bestimmen. Die Geräte sollen dabei an fünf Arbeitstagen je Woche während der 8stündigen Arbeitsschicht betrieben werden.

Sollwerte der Drift je Woche

$$|\Delta c_A| \leq 5\% \text{ vom Meßbereichsendwert}$$

4.3.6. Prüfung der Nullpunktlage und der Anzeige in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (zu 3.4.3.)

Zweck der Prüfung: Feststellung der Abweichung der Anzeige vom Sollwert in Abhängigkeit von der Temperatur T, dem Luftdruck p und der relativen Feuchte bei verschiedenen Batteriespannungen U_B.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Betrieb des Prüflings bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, Aufgabe von reinem Stickstoff bzw. Standardprüf-

gas, Messung der Nullpunktslage bzw. des Prüfgasignals bei konstanter Versorgungsspannung U_B und konstantem Volumenstrom \dot{V} und Bestimmung der Abhängigkeiten

$$c_N = f(T, p, \varphi)$$

$$c_A = F(T, p, \varphi)$$

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Klimatische Prüfbedingungen nach folgender Tabelle, wobei als konstante Versorgungsspannungen U_B zu verwenden sind:

U_{B1} Batteriespannung 12 Stunden nach Vollaufladung der Batterie

U_{B2} mittlere Entladespannung der Batterie

U_{B3} Spannung an der unteren Entladegrenze

Festgehaltene Größen	Variable Größen	Aufgabe von	Bestimmung von
T in K			
$\varphi = 50\%$ = const	253	reinem Stickstoff	$\frac{\Delta c_N}{\Delta T}$
$p = 1.000 \text{ mbar}$ = const	273		
\dot{V}_B (Betriebswert) = const	293	Standardprüfgas	$\frac{\Delta c_A}{\Delta T}$
U_{B1}, U_{B2}, U_{B3} (Betriebswert) = const	313		
φ in %			
$p = 1.000 \text{ mbar}$ = const	35	reinem Stickstoff	$\frac{\Delta c_A}{\Delta \varphi}$
$T_1 = 278 \text{ K}$ = const	60		
$T_2 = 293 \text{ K}$ = const	80	Standardprüfgas	$\frac{\Delta c_A}{\Delta \varphi}$
$T_3 = 313 \text{ K}$ = const	95		
\dot{V}_B (Betriebswert) = const			
U_{B1}, U_{B2}, U_{B3} (Betriebswert) = const			
p in mbar			
$T = 293 \text{ K}$ = const	920	reinem Stickstoff	$\frac{\Delta c_N}{\Delta p}$
$\varphi = 50\%$ = const	960		
\dot{V}_B (Betriebswert) = const	1.000	Standardprüfgas	$\frac{\Delta c_A}{\Delta p}$
U_{B1}, U_{B2}, U_{B3} (Betriebswert) = const	1.080		

Sollwerte

$$\left| \frac{\Delta c_A}{\Delta T} \right| \leq \left| 2 \cdot 10^{-3} \cdot c_S \right| \frac{\% \text{ O}_2}{\text{K}} \quad 273 \text{ K} < T < 313 \text{ K}$$

bzw.

$$\left| \frac{\Delta c_A}{\Delta T} \right| \text{ nicht größer als es der prozentualen Dichteänderung entspricht}$$

$$\left| \frac{\Delta c_A}{\Delta p} \right| \leq \left| 10^{-3} \cdot c_S \right| \frac{\% \text{ O}_2}{\text{mbar}} \quad 920 \text{ mbar} < p < 1.080 \text{ mbar}$$

bzw.

$$\left| \frac{\Delta c_A}{\Delta p} \right| \text{ nicht größer als es der prozentualen Dichteänderung entspricht}$$

$$\left| \frac{\Delta c_A}{\Delta \varphi} \right| \leq \left| 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot c_S \right| \frac{\% \text{ O}_2}{\%} \quad 35\% < \varphi < 95\%$$

Für c_S ist der O_2 -Gehalt am Meßbereichsendwert zu setzen.

4.3.7. Prüfung der Anzeige in Abhängigkeit von der Bestimmung des Meßwertgebers (zu 3.4.3.)

Zweck der Prüfung: Feststellung der Abweichung der Anzeige vom Sollwert in Abhängigkeit von der Größe des Volumenstromes durch den Meßwertgeber oder durch die Prüfeinrichtung bei Diffusionsgeräten.

Feststellung der Abweichung der Anzeige vom Sollwert in Abhängigkeit von der Anströmung des Meßwertgebers bei Diffusionsgeräten.

Vorbehandlung: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Betrieb des Prüflings unter Laborbedingungen und bei konstanter Versorgungsspannung, Aufgabe von Standardprüfgas bei unterschiedlichem Volumenstrom \dot{V} bzw. bei unterschiedlicher Anströmung bei Diffusionsgeräten, Messung der Prüfgasanzeige c_A .

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Variationen des Volumenstromes durch den Meßwertgeber oder die Prüfeinrichtung:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 0,5 \cdot \dot{V}_B \\ &= 1,0 \cdot \dot{V}_B \\ &= 1,5 \cdot \dot{V}_B \end{aligned}$$

\dot{V}_B = Betriebswert des Volumenstromes

Bei Diffusionsgeräten unterschiedliche Anströmrichtungen und -geschwindigkeiten bis 6 m/s.

Sollwerte

$$\left| \Delta c_A \right| \leq 12\% \text{ vom Meßbereichsendwert}$$

4.3.8. Prüfung des Einflusses von Störgasen und -dämpfen (zu 3.4.3.)

Zweck der Prüfung: Untersuchung der Wirkung von Störgasen und -dämpfen auf die Prüfgasanzeige und das Anzeigeverhalten.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Aufgeben von Standardprüfgas; dem Prüfgas ist je nach Verwendungsbereich die jeweilige Störkomponente in festgelegter Konzentration beigemischt. Registrierung der Prüfgasanzeige c_A . Die Messungen müssen mit den für den Verwendungszweck vorgesehenen Filtern und Vorlagen durchgeführt werden.

Nachbehandlung: Spülung mit Prüfgas

Endmessung: Funktionsprüfung

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollwerten.

Einzelbestimmungen: Art und Konzentration der Störgase und -dämpfe sind aufgrund ihres Vorkommens im vorgesehenen Einsatzbereich der O₂-Meßgeräte auszuwählen.

Sollwerte

Zulässige Abweichungen:

- Bei Querempfindlichkeit des Prüflings gegen Störkomponenten, die keine bleibende Änderung der Empfindlichkeit hervorrufen
 $|\Delta c_A| \leq 1\% \text{ vom Meßbereichsendwert}$
- Bei Störkomponenten, die eine bleibende Änderung der Empfindlichkeit hervorrufen können
 $|\Delta c_A| \leq 10,05 \cdot c_S$

In beiden Fällen für eine Betriebsdauer von 200 Stunden oder Angabe der Betriebsdauer, nach der die o. a. Fehlergrenzen überschritten werden.

Für c_S ist der O₂-Gehalt des Standardprüfgases zu setzen.

4.3.9. Prüfung des Einflusses von Staub (zu 3.4.3.)

Zweck der Prüfung: Feststellung des Einflusses von Staub auf die Anzeige, das Anzeigeverhalten und die Betriebssicherheit des Prüflings.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen: Kontrolle auf Staubfreiheit, Funktionsprüfung.

Beanspruchung bzw. Hauptmessung: Aufgabe von staubhaltiger Luft mit einem Volumengehalt an O₂ von 21 %.

Endmessung: Funktionsprüfung und Prüfung des Gasweges nach 4.3.2.

Ergebnisse und Beurteilung: Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

Einzelbestimmungen: Art und Konzentration der staubförmigen Anteile werden aufgrund ihres Vorkommens im vorgesehenen Einsatzbereich von Fall zu Fall ausgewählt oder die Prüfung wird im Einsatzbereich vorgenommen.

Sollzustand

Funktionsprüfung ohne Mängel unter Angabe der Betriebszeit.

Prüfungszeit im Bergbau etwa drei Monate untertage.

4.3.10. Prüfung des Lageeinflusses (zu 3.4.3.)

Zweck der Prüfung: Feststellung der Änderungen der Nullpunktlage und der Prüfgasanzeige bei Ab-

weichungen von der Gebrauchslage des Prüflings.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen:

Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung:

Aufgabe von reinem Stickstoff und Standardprüfgas, Messungen in Gebrauchslage und in weiteren Lagen nach den Einzelbestimmungen. Bestimmung der Nullpunktlage c_N, der Prüfgasanzeige c_A und des Anzeigeverhaltens.

Ergebnisse und Beurteilung:

Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

Einzelbestimmungen:

Die Lage von O₂-Handmeßgeräten und von tragbaren O₂-Meßeinrichtungen sowie von Meßwertgebern wird durch den Winkel zwischen der Längsachse des Gerätes und der Horizontalen bestimmt. Die Gebrauchslage muß vom Hersteller angegeben werden. Die Untersuchungen werden bei Längs- und Querneigungen um ± 15° und um ± 90° von der Gebrauchslage vorgenommen; bei O₂-Handmeßgeräten und Meßwertgebern zusätzlich in beliebiger Gebrauchslage.

Sollzustand

$|\Delta c_N, \Delta c_A| \leq 2\% \text{ vom Meßbereichsendwert}$

$|\Delta c_N, \Delta c_A| \leq 5\% \text{ vom Meßbereichsendwert bei beliebiger Gebrauchslage}$

4.3.11. Prüfung der Meßunsicherheit (zu 3.4.4.)

Zweck der Prüfung:

Bestimmung des Ablese- und Anzeigefehlers des Prüflings, Bestimmung der Fehler bei der Grenzsignalauslösung.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen:

Funktionsprüfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung:

Prüfung des Ablesefehlers:

Abschätzung des Verhältnisses von Zeigerbreite l_Z zu Teilstrichabstand l_T und des Parallaxenfehlers Δc in verschiedenen Bereichen der Skala. Feststellung der letzten noch sicher ablesbaren Dezimalstelle der Anzeige.

Prüfung des Anzeigefehlers und der Grenzsignalauslösung:

Wiederholte Aufgabe von Standardprüfgas im Wechsel mit Luft (n = 100). Anzeige des Meßsignals auf einem Digitalmeßgerät mit mindestens drei Stellen unter Laborbedingungen bei konstanter Versorgungsspannung. Feststellung der Grenzsignalauslösung.

Ergebnisse und Beurteilung:

Beurteilung nach den Abweichungen der Istwerte von den in den Einzelbestim-

mungen angegebenen Sollwerten.

Einzelbestimmungen:

Sollwerte

Ablesefehler:

$$\frac{I_Z}{I_T} < 0,2 \text{ in allen Me\ssbereichen}$$

Parallaxenfehler:

$$|\Delta c_N, \Delta c_A| \leq |1\%| \text{ vom Me\ssbereichsendwert}$$

Angabe der letzten sicher ablesbaren Dezimalstelle.

Wiederholungsfehler, Grenzsingalausl\u00f6sung:

Die Abweichungen der auf dem Digitalme\ssger\u00e4t angezeigten Werte vom Sollwert m\u00fcssen bei mindestens 95 Messungen kleiner sein als:

$$|\Delta c_A| \leq |0,5\%| \text{ vom Me\ssbereichsendwert}$$

Bei Einstellung des Grenzsingalgebers in der Mitte der angegebenen Schwankungsbereiche mu\ss das Grenzsingal bei mindestens 95 % der Messungen ausgel\u00f6st werden.

4.3.12. Pr\u00fcfung des Anzeigeverhaltens (zu 3.5.)

Zweck der Pr\u00fcfung:

Feststellung des zeitlichen Verlaufs der Anzeige von der Gasaufgabe bis nach der Einstellung des Me\sswertes bei Pr\u00fcfgas mit O₂-Gehalten im Me\ssbereich; Feststellung der durch Alterung hervorgerufenen \u00c4nderungen des Anzeigeverhaltens.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen:

Funktionspr\u00fcfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung:

Aufgeben von Pr\u00fcfgas im Me\ssbereich mit mindestens vier verschiedenen O₂-Gehalten, Feststellung des zeitlichen Verlaufs der Anzeige.

Pr\u00fcfung der \u00c4nderung des Anzeigeverhaltens:

Durchf\u00fchrung der Pr\u00fcfungen bei Versuchsbeginn und nach einem Monat.

Endmessung:

Funktionspr\u00fcfung

Ergebnisse und Beurteilung:

Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

Einzelbestimmungen:

O₂-Gehalte etwa 10, 25, 50 und 80 % des Pr\u00fcfgases: vom Me\ssbereichsendwert und Luft mit 21 % O₂

Sollzustand

Bei Aufgabe von Pr\u00fcfgas mit O₂-Gehalten im Me\ssbereich mu\ss der Zeiger (die Marke) stetig auf den der Me\ssgr\u00f6\ss e entsprechenden Me\sswert ansteigen und dort verharren. Bei Abnahme des O₂-Gehaltes

mu\ss die Anzeige stetig abfallen. Bei Anschlu\ss eines Schreibger\u00e4tes mu\ss gew\u00e4hrleistet sein, da\ss nur der Me\sswert aufgezeichnet wird.

O₂-Gehalte au\ss erhalb des Me\ssbereichs d\u00fcrfen nicht im Me\ssbereich angezeigt werden.

4.3.13. Pr\u00fcfung der Grenzsingalgabe (zu 3.7.)

Zweck der Pr\u00fcfung:

Feststellung, ob bei Erreichen der vorgegebenen Grenzwerte und bei St\u00f6rungen in der Me\ss einrichtung selbstt\u00e4tig und unverz\u00f6gert Signale ausgel\u00f6st werden.

Vorbehandlung und Anfangsmessungen:

Funktionspr\u00fcfung

Beanspruchung bzw. Hauptmessung:

Aufgabe von Pr\u00fcfgas mit O₂-Gehalten, die den eingestellten Schaltschwellen entsprechen. Simulierung von St\u00f6rungen, z. B. durch Verschlie\ss en des Gasweges, Unterbrechen der Me\ssleitung, St\u00f6rung der Stromversorgung.

Ergebnisse und Beurteilung:

Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

Einzelbestimmungen:

Ausl\u00f6sung der Signale bei vorgegebenem Grenzwert innerhalb der zul\u00e4ssigen Fehlergrenzen, au\ss erdem bei Ausfall des Volumenstromes, bei Unterbrechung der Me\ssleitung sowie bei St\u00f6rungen der Stromversorgung. Nach Unterschreiten des eingestellten Grenzwertes darf die Verz\u00f6gerungszeit bis zur Ausl\u00f6sung des Signals eine Sekunde nicht \u00fcberschreiten.

4.3.14. Pr\u00fcfung der Einrichtungen f\u00fcr die Me\sswert\u00fcbertragung (zu 3.7.)

Zweck der Pr\u00fcfung:

Soweit Einrichtungen f\u00fcr die Me\sswert\u00fcbertragung vorgesehen sind, Feststellung der durch die Me\sswert\u00fcbertragung verursachten Fehler.

Vorbehandlung und Anfangsmessung:

Aufbau einer Me\sslinie mit \u00dcbertragungseinrichtung, Schreiber und ggf. Grenzsingalgebern.

Beanspruchung bzw. Hauptmessung:

Pr\u00fcfung der Linearit\u00e4t der \u00dcbertragungseinrichtung durch stufenweises Aufgeben von definierten Spannungen.

Ergebnisse und Beurteilung:

Beurteilung nach den Abweichungen des Istzustandes von dem in den Einzelbestimmungen angegebenen Sollzustand.

Einzelbestimmungen:

Sollzustand

F\u00fcr die durch die Me\sswert\u00fcbertragung entstehenden zus\u00e4tzlichen Fehler gelten die gleichen Fehlergrenzen wie sie unter 3.4.1. f\u00fcr das O₂-Me\ssger\u00e4t festgelegt sind.

Anhang 1

Übersicht über Größen und Einheiten

Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Einheit
Masse	m	kg
Frequenz	f	Hz
Druck	p	mbar
Zeit (Einstellzeit, Verweilzeit)	t (t _E , t _W)	s
Volumenstrom (Betriebswert des Volumenstromes)	\dot{V} (\dot{V}_B)	cm ³ · s ⁻¹
Volumen, z. B. Volumen des Gasweges	V	cm ³
Volumengehalt an Sauerstoff*) (O ₂ -Gehalt)	c	%
Partialdruck an Sauerstoff	pO ₂	mbar
Konzentration an Sauerstoff je Volumeneinheit	gO ₂	g/m ³
Standardprüfgas, Sauerstoff vom Prüfling angezeigter O ₂ -Gehalt	c _S (X _S nach DIN 1310)	%
Nullpunktslage	c _A (X _A nach DIN 1310)	%
Batteriespannung, Spannungsanzeige	c _N (X _N nach DIN 1310)	%
Elektrisches Meßsignal	U _B	V
Temperatur	U _M	mV, V
Relative Feuchte	T	K
Länge, Breite (Zeigerbreite, Teilstrichabstand, Skalenlänge)	φ	%
Empfindlichkeit	l (l _Z , l _T , l _S)	mm
	$E_L = \frac{\Delta L}{\Delta c}$	$\frac{mm}{\%}$
	$E_U = \frac{\Delta U_M}{\Delta c}$	$\frac{mV}{\%}$
Zahl der Messungen	n (n _M , n _E)	

Änderungen der jeweiligen Meßgrößen werden durch das Symbol Δ vor der Einheit bezeichnet, z. B. ΔT, Δp usw.

Anhang 2

Zusammenstellung der angezogenen Vorschriften und sonstigen Bestimmungen

BVOSt	vom 20. 2. 1970 Bergverordnung des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen für die Steinkohlenbergwerke Verlag: Herrmann Bellmann Buchdruckerei, Bornstr. 20, 4600 Dortmund 1 Verlagsnummer 13
-------	---

*) Der Volumengehalt entspricht in diesen Richtlinien der Volumenkonzentration, da für Sauerstoff beim Mischvorgang mit Stickstoff die Volumenänderung praktisch vernachlässigbar ist.

BVOE

vom 1. 4. 1968

Bergverordnung über elektrische Anlagen des Oberbergamtes in Dortmund

Verlag: Herrmann Bellmann Buchdruckerei,
Bornstr. 20,
4600 Dortmund 1
Verlagsnummer 20

VDI 2450

Entwurf November 1973

Messen von Emission, Transmission und Immission luftverunreinigender Stoffe; Begriffe, Definitionen, Erläuterungen

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

VDI 2449

von Oktober 1970

Prüfkriterien von Meßverfahren
Datenblatt zur Kennzeichnung von Analysenverfahren für Gas-Immissionsmessungen

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

VDI 2600

von November 1973

Metrologie (Meßtechnik)

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

VDI 2180

von Dezember 1966 und Ergänzungen bis 1973

Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik, Einführung, Begriffe, Erklärungen

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

DIN 1319

von November 1971

Grundbegriffe der Meßtechnik

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

DIN 40045 u. 40046

von 1968 bis 1972

Klimatische und mechanische Prüfungen für elektrische Bauelemente und Geräte der Nachrichtentechnik; Richtlinien für die Bildung von klimatischen Prüfklassen

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

VDE 0410

von August 1970

Regeln für elektrische Meßgeräte

Verlag: VDE,
Bismarckstr. 33,
1000 Berlin 12

VDE 0170/0171

von Dezember 1970

Vorschriften für schlagwetterge-

schützte/explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel VG 95332

Verlag: VDE,
Bismarckstr. 33,
1000 Berlin 12

von November 1964
Klimatische und mechanische Prüfungen an Fernmeldegeräten;
Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

von September 1970
Zusammensetzung von Mischphasen (Gasgemische, Lösungen, Mischkristalle) Grundbegriffe

Verlag: Beuth,
Kamekestr. 2 – 8,
5000 Köln 1

BB 22444

von März 1971
Bergbau-Betriebsblatt
Geräte und Anlagen der Fernwerktechnik DIN 1310

Bezug: Steinkohlenbergbauverein,
Dezernat Normung und Vereinheitlichung,
Frillendorfer Str. 351,
4300 Essen-Kray

Bekanntmachung von Zulassungen für die Verpackung gefährlicher Seefrachtgüter

**Bundesanstalt für Materialprüfung
(BAM)
ZULASSUNGSSCHEIN**
für die Verpackung eines gefährlichen Seefrachtgutes
Nr. D/03 511/5LIC

1. Rechtsgrundlagen

- 1.1 IMCO/IMDG-Code als Anlage 4 zur Verordnung über gefährliche Seefrachtgüter (SFO).
- 1.2 § 1 Absatz 6 Ziffer 5 der Verordnung über gefährliche Seefrachtgüter (SFO) vom 4.1.1960 (BGBl. II S. 9), in der jeweils gültigen Fassung.

2. Antragsteller

Karl O. Helm
Nordkanalstraße 28
D-2000 Hamburg 1

3. Zu transportierender Stoff

	Deutsche IMCO-Nr.	UN Nr.
Natriumsalz der 2,4-Dichlorphenoxyessigsäure	9036-1	1609

4. Art der Verpackung

Äußerer Sack aus textilem Gewebe mit eingesetztem slagigem Papiersack und innerem Polyäthylen-Foliensack.
Das maximale Netto-Gewicht beträgt 40 kg.

5. Begründung der Zulassung der Verpackungsart

Eine nach den UN-Richtlinien durchgeführte und im Prüfungszeugnis BAM 3.3/8816 vom 22.6.1977 festgehaltene Baumusterprüfung hat ergeben, daß die beantragte Verpackungsart die im Regelwerk "Transport of Dangerous Goods", United Nations, New York, 1976, geforderten Qualitätsanforderungen erfüllt.

Die BAM läßt daher die von der Firma
Karl O. Helm
Nordkanalstraße 28
D-2000 Hamburg 1

beantragte Verpackungsart für den Seeschifftransport des
Natriumsalzes der 2,4-Dichlorphenoxyessigsäure

unter folgenden Auflagen zu:

- 5.1 Alle für die Stoffklasse, den beantragten Stoff und die beantragte Verpackung einschlägigen Vorschriften des IMCO/IMDG-Code sind zu beachten und einzuhalten.
- 5.2 Binnen vier Wochen nach Ausstellung dieses Zulassungsscheins ist der Bundesanstalt für Materialprüfung vom Antragsteller ein Verpackungsmuster zuzustellen, das aus der Gesamtheit der zu verwendenden Verpackungen stammen muß.
- 5.3 Durch die Verpackung verursachte Schadensfälle sind der Bundesanstalt für Materialprüfung umgehend in Form eines fotografisch belegten Schadensberichts zu melden.

Hinweis

Eine Kopie dieses Zulassungsscheins ist den Beförderungspapieren der jeweiligen Sendung beizufügen.

Berlin 45, den 22. Juni 1977
BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG
(BAM)

Abteilung 3
Organische Stoffe
i.V.
Reg.Dir. Dr. G. Mirisch

Fachgruppe 3.3
Papier, Druck, Verpackung
i.V.
Dr. A. Kallmann

Sachbearbeiter: Dr. D. Hellhammer

**Bundesanstalt für Materialprüfung
(BAM)
ZULASSUNGSSCHEIN**
für die Verpackung eines gefährlichen Seefrachtgutes
Nr. D/03 512/3 H 1

1. Rechtsgrundlagen

- 1.1 IMCO/IMDG-Code als Anlage 4 zur Verordnung über gefährliche Seefrachtgüter (SFO).
- 1.2 § 1 Absatz 6 Ziffer 5 der Verordnung über gefährliche Seefrachtgüter (SFO) vom 4. Januar 1960 (BGBl. II, S. 9), in der jeweils gültigen Fassung.

2. Antragsteller

Sulo Eisenwerk – Streuber und Lohmann
Waltgerstraße 29 – 37
4900 Herford

3. Zu transportierender Stoff

	Deutsche IMCO-Nr.	UN Nr.
Natronlauge 50 %ig	8223	1824

4. Art der Verpackung

Freitragender Kunststoffbehälter aus Polyäthylen, Nennvolumen 30 l, Typ „Modul-Kanister“

5. Begründung der Zulassung der Verpackungsart

Aus dem der BAM als Beurteilungsunterlage vorgelegten 1. Nachtrag zum Bericht 89 296 Vgab 40 der Bundesbahn-Versuchsanstalt Minden (Westf.) vom 25. April 1977 geht hervor, daß die beantragte Behälter-Bauart die nach den „Richtlinien für die Baumusterprüfung und Zulassung von freitragenden Kunststoffgefäßen zur Beförderung gefährlicher Stoffe“ des Bundesministers für Verkehr vom 8. März 1976 (Verkehrsblatt, H. 6, S. 258 – 262/31. März 1976) durchgeführte Baumusterprüfung bestanden hat.

Die BAM läßt daher die von dem
Sulo Eisenwerk – Streuber und Lohmann
Waltgerstraße 29 – 37
4900 Herford

aus Polyäthylen-Formmasse „Lupolen 5261 Z“ naturfarben,
mit naturfarbener Schraubkappe aus „Lupolen 4261 A“ und
mit naturfarbener Rundschnurdichtung aus „Perbunan N“
gefertigte Behälter-Bauart für den Seeschifftransport von

UN Nr.

Natronlauge 50 %ig

1824

unter folgenden Auflagen zu:

- 5.1 Alle für die Stoffklasse, die beantragten Stoffe und die beantragte Verpackung einschlägigen Vorschriften des IMCO/IMDG-Code*) sind zu beachten und einzuhalten.
- 5.2 Binnen vier Wochen nach Ausstellung dieses Zulassungsscheins ist der Bundesanstalt für Materialprüfung vom Antragsteller ein Verpackungsmuster zuzustellen, das aus der Gesamtheit der zu verwendenden Verpackungen stammen muß.
- 5.3 Durch die Verpackung verursachte Schadensfälle sind der Bundesanstalt für Materialprüfung umgehend in Form eines fotografisch belegten Schadensberichts zu melden.

*) Zu beziehen über den
K. O. Störck & Co. Verlag, Stahlwiete 7, D-2000 Hamburg 50

6. Kennzeichnung

Jeder Behälter ist dauerhaft und gut lesbar zu kennzeichnen mit:

Namen oder Kennzeichen des Sulo Eisenwerkes.
Füllung mit Gefahrgut nur gem. D/BAM/89 296
Fertigungsmonat und -jahr.
Gebrauchsdauer in Monaten oder Jahren.

Der Verschuß ist wie folgt zu kennzeichnen:

Namen oder Kennzeichen des Sulo Eisenwerkes.
D/BAM/3.01.

Hinweis

Eine Kopie dieses Zulassungsscheins ist den Beförderungspapieren der jeweiligen Sendung beizufügen.

Berlin 45, den 12. Juli 1977

BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG (BAM)

Abteilung 3

Organische Stoffe

i. V.

RegDir. Dr. G. Mirisch

Fachgruppe 3.3

Papier, Druck, Verpackung

Dir. u. Prof. Dr.-Ing. W. Franke

Sachbearbeiter: Dr. D. Hellhammer

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)

ZULASSUNGSSCHEIN

für die Verpackung eines gefährlichen Seefrachtgutes
Nr. D/03 513/3 H 1

1. Rechtsgrundlagen

- 1.1 IMCO/IMDG-Code als Anlage 4 zur Verordnung über gefährliche Seefrachtgüter (SFO).
- 1.2 § 1 Absatz 6 Ziffer 5 der Verordnung über gefährliche Seefrachtgüter (SFO) vom 4. Januar 1960 (BGBl. II, S. 9), in der jeweils gültigen Fassung.

2. Antragsteller

Sulo Eisenwerk – Streuber und Lohmann
Waltgerstraße 29 – 37
4900 Herford

3. Zu transportierende Stoffe

	Deutsche IMCO-Nr.	UN Nr.
Salpetersäure 55 %ig	8187	2031
Salzsäure 38 %ig	8182	1789
Schwefelsäure 96 %ig	8229	1831
Essigsäure 98 %ig	3309	1842

4. Art der Verpackung

Freitragender Kunststoffbehälter aus Polyäthylen, Nennvolumen 30 l, Typ „Modul-Kanister“

5. Begründung der Zulassung der Verpackungsart

Aus dem der BAM als Beurteilungsunterlage vorgelegten 1. Nachtrag zum Bericht 89 296 Vgab 40 der Bundesbahn-Versuchsanstalt Minden (Westf.) vom 25. April 1977 geht hervor, daß die beantragte Behälter-Bauart die nach den „Richtlinien für die Baumusterprüfung und Zulassung von freitragenden Kunststoffgefäßen zur Beförderung gefährlicher Stoffe“ des Bundesministers für Verkehr vom 8. März 1976 (Verkehrslatt, H. 6, S. 258 – 262/31. März 1976) durchgeführte Baumusterprüfung bestanden hat.

Die BAM läßt daher die von dem

Sulo Eisenwerk – Streuber und Lohmann
Waltgerstraße 29 – 37
4900 Herford

aus Polyäthylen-Formmasse „Lupolen 5261 Z“ naturfarben,
mit naturfarbener Schraubkappe aus „Lupolen 4261 A“ und
mit Rundschnurdichtung aus „Hypalon“
gefertigte Behälter-Bauart für den Seeschifftransport von

UN Nr.

Salpetersäure 55 %ig	2031
Salzsäure 38 %ig	1789
Schwefelsäure 96 %ig	1831
Essigsäure 98 %ig	1842

unter folgenden Auflagen zu:

- 5.1 Alle für die Stoffklasse, die beantragten Stoffe und die beantragte Verpackung einschlägigen Vorschriften des IMCO/IMDG-Code*) sind zu beachten und einzuhalten.
- 5.2 Binnen vier Wochen nach Ausstellung dieses Zulassungsscheins ist der Bundesanstalt für Materialprüfung vom Antragsteller ein Verpackungsmuster zuzustellen, das aus der Gesamtheit der zu verwendenden Verpackungen stammen muß.
- 5.3 Durch die Verpackung verursachte Schadensfälle sind der Bundesanstalt für Materialprüfung umgehend in Form eines fotografisch belegten Schadensberichts zu melden.

*) Zu beziehen über den
K. O. Störck & Co. Verlag, Stahlwiete 7, D-2000 Hamburg 50

6. Kennzeichnung

Jeder Behälter ist dauerhaft und gut lesbar zu kennzeichnen mit:

Namen oder Kennzeichen des Sulo Eisenwerkes.
Füllung mit Gefahrgut nur gem. D/BAM/89 296.
Fertigungsmonat und -jahr.
Gebrauchsdauer in Monaten oder Jahren.

Der Verschuß ist wie folgt zu kennzeichnen:

Namen oder Kennzeichen des Sulo Eisenwerkes.
D/BAM/3.03.

Hinweis

Eine Kopie dieses Zulassungsscheins ist den Beförderungspapieren der jeweiligen Sendung beizufügen.

Berlin 45, den 12. Juli 1977

BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG (BAM)

Abteilung 3

Organische Stoffe

i. V.

RegDir. Dr. G. Mirisch

Fachgruppe 3.3

Papier, Druck, Verpackung

Dir. u. Prof. Dr.-Ing. W. Franke

Erlaß des Bundesministers für Wirtschaft über die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) vom 1. September 1964

(Auszug aus: Bundesanzeiger Nr. 162 vom 2. 9. 1964, S. 1)

§ 1

Zweck

Die Bundesanstalt für Materialprüfung soll die Entwicklung der deutschen Wirtschaft fördern, indem sie Bundesaufgaben nach den §§ 2 bis 6 und Aufgaben im Lande Berlin nach § 7 erfüllt.

§ 2

Aufgabe

(1) Die Bundesanstalt hat die Aufgabe, Werkstoff- und Materialforschung entsprechend ihrer Zweckbestimmung zu betreiben und die Materialprüfung sowie die chemische Sicherheitstechnik stetig weiterzuentwickeln.

(2) Ihre Forschung ist nicht an die Person gebunden. Jedes Ergebnis ihrer Arbeit soll auf der Erkenntnis aller von ihr gepflegten, fachlich beteiligten Wissensgebiete beruhen.

(3) Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen.

...

§ 4

Aufgaben innerhalb der Verwaltung

(1) Die Bundesanstalt berät die Bundesministerien.

(2) Sie führt die Aufgaben durch, die ihr vom Bundesminister für Wirtschaft oder im Einvernehmen mit ihm von anderen Bundesministern übertragen werden.

(3) Ersuchen von Verwaltungsbehörden und von Gerichten soll sie in den Grenzen ihrer Aufgaben entsprechen.

§ 5

Aufträge

Die Bundesanstalt übernimmt Aufträge aus der Wirtschaft oder von Einrichtungen der Verbraucher und der Verbraucherberatung, soweit sie die Voraussetzungen der §§ 2 und 3 erfüllen. Sie kann Aufträge ablehnen, deren Ausführung nach ihrer Auffassung keine wissenschaftlich wertvollen Erkenntnisse erwarten läßt oder deren Ergebnisse weder volkswirtschaftlich noch für die Schaden- und Unfallverhütung von Belang sind.

§ 6

Zusammenarbeit

(1) Zur Erfüllung ihrer Aufgaben, hält die Bundesanstalt Verbindung zum Bundesminister für Wirtschaft und wirkt mit in den technischen Ausschüssen der Bundesministerien, dem Deutschen Normenausschuß (DNA), der internationalen Normenorganisation (ISO) und anderen nationalen, internationalen oder supranationalen Stellen, die für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung von Bedeutung sind.

(2) Sie hält ferner Verbindung zu den wissenschaftlichen Hochschulen und Instituten, den staatlichen Materialprüfämtern und den Verbänden für Materialprüfung.

§ 7

Aufgaben im Land Berlin

Für das Gebiet des Landes Berlin hat die Bundesanstalt die Aufgaben eines staatlichen Materialprüfungsamtes.

§ 8

Gebühren

Die Bundesanstalt erhebt für die Bearbeitung von Aufträgen Gebühren nach einer Gebührenordnung, welche der Zustimmung des Bundesministers für Wirtschaft bedarf.

...

§ 12

Inkrafttreten

Dieser Erlaß tritt am 1. September 1964 in Kraft; gleichzeitig treten der Erlaß vom 20. August 1954 (Bundesanzeiger Nr. 165 vom 28. August 1954, BWM BI 1954 S. 367) und die zu seiner Änderung ergangenen Erlasse vom 10. Februar 1956 (Bundesanzeiger Nr. 36 vom 21. Februar 1956, BWM BI 1956 S. 114) und vom 6. November 1962 (Bundesanzeiger Nr. 220 vom 20. November 1962, BWM BI 1962 S. 241) außer Kraft.

Bonn, den 1. September 1964

Z 4 - 44 02 19 -

Der Bundesminister für Wirtschaft Schmücker

Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz) vom 25. August 1969

(Auszug aus: Bundesgesetzblatt 1969, Teil I, S. 1358)

§ 28

Rechtsstellung der Bundesanstalt für Materialprüfung

(1) Die Bundesanstalt für Materialprüfung ist eine bundesunmittelbare, nicht rechtsfähige Anstalt des öffentlichen Rechts im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft; sie ist eine Bundesoberbehörde.

§ 29

Aufgaben der Bundesanstalt für Materialprüfung

Der Bundesanstalt für Materialprüfung obliegt die Durchführung und Auswertung physikalischer und chemischer Prüfungen von Stoffen und Konstruktionen. Sie ist zuständig

1. für die Entgegennahme der Anzeigen und Stoffproben nach § 1 Abs. 4 Satz 1 und die Anordnungen nach § 1 Abs. 4 Satz 3 und 4,
2. für die Zulassung von explosionsgefährlichen Stoffen und Sprengzubehör nach § 4 Abs. 1 bis 4.

...

Die verfassungsmäßigen Rechte des Bundesrates sind gewahrt. Das vorstehende Gesetz wird hiermit verkündet.

Bonn, den 25. August 1969

Der Bundespräsident Heinemann

Der Stellvertreter des Bundeskanzlers Brandt

Für den Bundesminister für Wirtschaft
Der Bundesminister des Auswärtigen Brandt

Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vom 18. August 1969

(Auszug aus: Bundesgesetzblatt 1969, Teil II, S. 1489)

Artikel 1

Dem in Genf am 13. Dezember 1957 von der Bundesrepublik Deutschland unterzeichneten Europäischen Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) einschließlich der Anlagen in ihrer am 29. Juli 1968 geänderten Fassung wird zugestimmt. Das Übereinkommen wird nachstehend, die Anlagen A und B werden in einem Anlagenband veröffentlicht.

...

Artikel 4

(1) Zuständig für die Ausführung des Übereinkommens sind

...

3. die Bundesanstalt für Materialprüfung für die Zulassung der Bauart von Verpackungen und für die Genehmigung der Beförderung ohne Schutzbehälter;

...

Das vorstehende Gesetz wird hiermit verkündet.

Bonn, den 18. August 1969

Der Bundespräsident Heinemann

Der Bundeskanzler Kiesinger

Für den Bundesminister für Verkehr
Der Bundesminister für das Post- und Fernmeldewesen Dollinger

Der Bundesminister des Auswärtigen Brandt

Waffengesetz (WaffG) vom 19. September 1972

(Auszug aus: Bundesgesetzblatt 1972, Teil I, S. 1797)

§ 23

Zulassung von Raketenmunition und Geschossen mit pyrotechnischer Wirkung

(1) Raketenmunition und Geschosse mit pyrotechnischer Wirkung dürfen nur eingeführt, sonst in den Geltungsbereich dieses Gesetzes verbracht oder gewerbsmäßig hergestellt werden, wenn sie ihrer Beschaffenheit, Zusammensetzung und Bezeichnung nach von der Bundesanstalt für Materialprüfung zugelassen sind.

(2) Die Zulassung ist zu versagen,

1. soweit der Schutz von Leben, Gesundheit oder Sachgütern des Benutzers oder Dritter bei bestimmungsgemäßer Verwendung nicht gewährleistet ist,
2. wenn die Munition oder die Geschosse den Anforderungen an die Zusammensetzung, Beschaffenheit, Maße, den höchstzulässigen normalen oder überhöhten Gebrauchgasdruck und die Bezeichnung (§ 26 Abs. 1) nicht entsprechen,
3. soweit die Munition oder die Geschosse in ihrer Wirkungsweise, Brauchbarkeit und Beständigkeit dem jeweiligen Stand der Technik nicht entsprechen.

(3) Absatz 1 ist nicht anzuwenden auf Raketenmunition und Geschosse mit pyrotechnischer Wirkung, die für die Bundeswehr, den Bundesgrenzschutz, die Bundeszollverwaltung oder die Polizeien der Länder hergestellt und ihnen überlassen werden.

(4) Die Bundesanstalt für Materialprüfung kann im Einzelfall Ausnahmen von dem Erfordernis der Zulassung nach Absatz 1 bewilligen, insbesondere wenn die in Absatz 1 bezeichneten Gegenstände zur Ausfuhr oder zum sonstigen Verbringen aus dem Geltungsbereich dieses Gesetzes bestimmt sind.

(5) § 21 Abs. 5 ist entsprechend anzuwenden.

...

Das vorstehende Gesetz wird hiermit verkündet.

Bonn, den 19. September 1972

Für den Bundespräsidenten
Der Präsident des Bundesrates Heinz Kühn

Der Bundeskanzler Brandt

Der Bundesminister des Innern Genscher

Der Bundesminister für Wirtschaft und Finanzen Schmidt

ORGANISATIONSPLAN DER BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG BERLIN (BAM) Stand 1. 6. 1977



AMTS- UND MITTEILUNGSBLATT DER BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG

Informationen über die Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin, ihre Aufgaben und Tätigkeiten, sowie über die verschiedenen Prüfverfahren und die Zusammenarbeit mit anderen Institutionen.

BAM JAHRESBERICHT 1976

Bundesanstalt für Materialprüfung

Wissenschaftliche Veröffentlichungen im Jahre 1975

BAM BERICHTE FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG IN DER BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG

Wissenschaftliche Berichte aus der Arbeit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin

BAM-Information 2/77

Table of contents for BAM-Information 2/77, listing various articles and their authors.



100 Jahre Materialprüfung in Berlin

