Von den Anfängen der Materialermüdung bei Metallen

Autor(en): **Lüling, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG**

Band (Jahr): **56 (1985)**

PDF erstellt am: **01.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-378180

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

derdurchmesser angegeben. Die Balancierlänge l ist durch die Anordnung der übrigen Elemente der Maschine (Geradführung, Steuerung, Luft- und Kondensatpumpe) gegeben. Man kann festigkeitstheoretisch nachweisen, dass zwischen h und d tatsächlich eine lineare Abhängigkeit besteht.[12]

Für gusseiserne Balanciers wird die Breite b (= Stegdicke) naturgemäss geringer ausgeführt.
Tredgold gibt hierfür an:
b = 0,0625 d ([13]/S. 243)

Damit waren, ausgehend von Watt, die Abmessungen der Balanciers festgelegt. Diese Verhältniszahlen wurden praktisch unverändert auch in die französischen und deutschen Lehrbücher übernommen.

Die von Redtenbacher[14] und Reuleaux[15] angegebenen Werte weichen nur unwesentlich von den oben aufgeführten ab.

Aus Gründen der Platz- und Materialersparnis wurde etwa ab 1870 mit neuen Anordnungsformen der Balancier bei Dampfmaschinen gänzlich eliminiert (Bild 7). Die von Watt empirisch gefundene Anordnung der Niederdruck-Dampfmaschine samt zugehörigen Dimensionierungsregeln war ein volles Jahrhundert lang Vorbild geblieben.

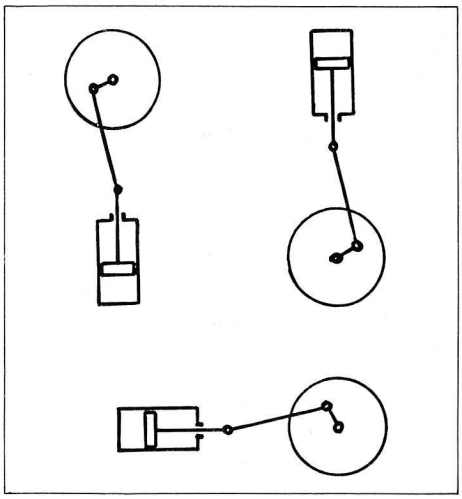


Bild 7: Neue Bauformen stationärer Dampfmaschinen (ab etwa 1870)

Von den Anfängen der Materialermüdung bei Metallen

Dipl. Ing. H. Lüling, Neuhausen a/Rhf.

1. Einleitung

Das Phänomen des Dauerbruchs oder auch Ermüdungsbruch genannt, ist eine typische Erscheinung, die vor etwa 150 Jahren erstmals an Eisenwerkstoffen erkannt worden ist. Vor dieser Zeit sind keine Aufzeichnungen oder Berichte überliefert, die darauf hindeuten, dass auch andere Werkstoffe wie Holz, Nichteisenmetalle, Textilien oder Steine in Bauwerken unter wiederholten Belastungen, auch nach langer Betriebsdauer, zerstört worden sind. Es scheint sich somit um eine typische «Flusseisen-Krankheit» zu handeln, deren Bauteile einer dem Eisen eigentümlichen oder inhärenten Eigenschaft, nämlich der «Ermüdung», unterworfen sind. Sie fällt in ihren ersten Erscheinungsformen mit der frühen Entwicklung des Eisenbahnwesens zusammen. Aber auch Fahrzeuge des Post- und Reisedienstes waren davon betroffen.

Betrachtet man die Darstellung über die zahlenmässige Entwicklung wissenschaftlicher Publikationen über die Ermüdungsfestigkeit von Metallen im Zeitraum 1900 ± 60 Jahre, so fällt auf, dass sich der Erkenntnisstand der Ermüdungswissenschaft in 2 Perioden vollzogen hat, nämlich die eine von 1838 (Versuche Albert) bis etwa zur Jahrhundertwende mit insgesamt etwa 18 Publikationen. Man könnte sie schlechthin als *«Pionierphase»* bezeichnen; die andere von 1900 bis etwa 1970 mit *statistisch belegbarem* Literaturmaterial nach R. Cazaud, «La Fatigue des Métaux», 1969 Dunod, Paris. Diese zweite Phase mit Wendepunkt um 1900, in welcher ein progressiver Anstieg der Veröffentlichungen pro Jahr zu verzeichnen ist, liesse sich am zutreffendsten mit einem «Klärungs- oder Reifungsprozess» erklären, welcher auch nach den geschätzten 10 000 Publikationen bis 1968 oder 600 Publikationen pro Jahr in Europa und USA keineswegs als abgeschlossen zu betrachten ist. Nach wie vor gilt das verwickelte Problem der dauernd zu ertragenden Schwingfestigkeit als immer noch nicht befriedigend gelöst, wahrscheinlich auch deshalb, weil man sich zu lange dem Irrglauben hingegeben hatte, die Untersuchung der Dauerfestigkeit auf nur wenige Versuchsparameter reduzieren zu können.

2. Der Begriff der Ermüdung, geschichtlich gesehen

Es muss für jeden Technikhistoriker geradezu eine Herausforderung sein, jenes zeitliche Stadium näher zu betrachten, welches unseren Ingenieur-Pionieren des letzten Jahrhunderts so riesiges Kopfzerbrechen bereitet hat. Wie haben sie auf das Phänomen der Ermüdungsbrüche reagiert, und mit welchen Hypothesen versuchten sie mit scheinbar primitiven Massnahmen der Bruchgefahr ihrer Bauteile zu begegnen? Allen war ja damals bewusst, dass die maximal vorkommende zulässige Spannung unter wiederholten Belastungen weit unterhalb der *statisch* bestimmten Bruchgrenze liegen musste, ja aus Sicherheitsgründen unterhalb der damals noch nicht genau definierten Fliessgrenze. Der undefinierbare Begriff der «Materialermüdung» wurde erstmals im Jahre 1853 vom Engländer F. Braithwaite eingeführt und nicht wie in den historischen Lehrbüchern über angewandte technische Mechanik behauptet, vom Franzosen Poncelet im Jahre 1839 (erst 1870).

Vorsichtiger drückte sich später August Wöhler aus, indem er eine «Zerrüttung» des Werkstoffgefüges als Ursache für vorzeitige Brüche

Erscheinungs-Jahr	Verfasser	Titel	Quelle
1838	W.A. Albert	Ueber Treibseile am Harz	Archiv f. Mineral., Geognosie, Bergbau u. Hüttenwesen Eisen-Bibliothek
1843	W.J.M. Rankine	On the causes of the unexpected breakage of the Journals of Railway Axles	Proc. Inst. Civil Engrs., Vol. 2, London
1849	J.E. McConnell	On Railway Axles	Proc. Inst. Mech. Engrs., London
1849	W. Fairbairn	On Tubular Girder Bridges	Proc. Inst. Civil Engrs., Vol. 9, London
1849	E. Hodgkinson H. James D. Galton	Report of the commissioners appointed to inquire into the application of iron to railway structure	Clowes, London
1850 (Jan.)	P.R. Hodge	Meeting Report	Proc. Inst. Mech. Engrs., London
1850 (April)	R. Stephenson	Meeting Report	Proc. Inst. Mech. Engrs., London
1853	A. Morin	Leçons de mécanique pratique Résistance des matériaux	Librairie de L. Hachette, Paris
1853	F. Braithwaite	On the fatigue and consequent fracture of metals	Proc. Inst. Civil Engrs., London
1864	W. Fairbairn	Experiments to determine the effect of impact, vibratory action and long-continued change on wrought iron girders	Phil. Trans. Royal Soc., London
1870	J.V. Poncelet	Introduction à la mécanique industrielle, physique ou expérimentale	3ième Edition Gauthier-Villar, Paris
1858 1870	A. Wöhler	Ueber Versuche zur Ermittlung der Festigkeit von Achsen	Z. Bauwesen 1858, 1860, 1863, 1866, 1870
1873	W. Launhardt	Die Inanspruchnahme des Eisens	Z. Arch. Ing.. Ver. Hannover, Bd. 19
1874	L. Spangenberg	Ueber das Verhalten der Metalle bei wiederholten Anstrengungen	Z. Bauwesen 24
1886	J. Bauschinger	Ueber die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahl durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals widerholte Beanspruchungen	Mitt. No. 15 TH München 13. Heft

Die wichtigsten Arbeiten über das Phänomen der Materialermüdung von Metallen im 19. Jahrhundert

annahm. Seltsamerweise hat sich der Ermüdungsbegriff bis in unsere Gegenwart behaupten können. Dafür gibt es von dem bekannten Festigkeitstheoretiker Anton Eichinger nachträglich elegant formulierte Erklärungsversuche, die etwa wie folgt lauten:
«Der feste Körper verhält sich bei wiederholter Belastung durch das Hinzukommen des Faktors Zeit und damit des Erinnerungsvermögens für seine Vorgeschichte in weit höherem Masse *wie ein lebendiges Wesen,* als man dies bei der *statischen* Beanspruchung anzunehmen geneigt war.»

3. Beobachtungen und Beschreibung von Ermüdungsbrüchen in Europa vor Wöhler

Die obenstehende Tabelle beinhaltet die wichtigsten in Europa erschienenen Berichte des letzten Jahrhunderts, chronologisch geordnet nach Erscheinungsjahr, Verfasser, Titel und Quelle. Sie betrifft also das Quellenstudium, in dieser Studie beschränkt bis und mit dem Jahre 1853. Einzelheiten dieser ersten historischen Arbeiten über Ermüdung von Eisenwerkstoffen zu beschreiben, würde den Rahmen dieser Abhandlung bei weitem sprengen. Da es sich bei den erwähnten Berichten ausschliesslich um beschreibende Beobachtungen und Erkenntnisse handelt, ohne weitreichende Gesetzmässigkeiten ableiten zu können, müsste eigentlich jede Arbeit für sich besprochen werden. Es soll deshalb versucht werden, je ein ausgewähltes Beispiel über Ermüdungsursachen aus dem *Bergbau,* aus dem *Postkutschen-Zeitalter* und aus dem *Eisenbahnbau* kurz zu charakterisieren.

3.1 Alberts Versuche über eiserne Kettenseile am Harz 1838

Die damals aufgetretenen Schwierigkeiten im Bergbau hingen damit zusammen, die zu jener Zeit fast ausschliesslich benutzten Hanfseile in den 35 Hauptförderschächten des oberharzischen Silbergrubenbergbaues durch schmiedeiserne Kettenseile allmählich zu ersetzen. Kurz nach ihrer Einführung ereigneten sich Hunderte von Brüchen pro Quartal, die nach 10wöchiger Betriebszeit meistens an den Gelenkstellen der Kettenglieder aufgetreten waren. Beschädigungen der Schächte, Betriebsstörungen und sogar Unfälle waren die Folge.

Die Ursache der Brüche glaubte man in den Gelenkstellen infolge Spannungswechsel und durch eine von Stössen begleitete Gelenkbiegung zu erkennen, die mit einer starken Kaltverfestigung verbunden war. Ermüdungsversuche unter simulierten Betriebsbedingungen mit 100 000 Lastwechseln im Jahre *1829* ergaben zwar keine Brüche, jedoch zeigten sich bei der anschliessenden Schlagprobe an den Gliedern dieser Versuchskette selbst, dass jedes Glied an der Gelenkstelle mit feinkörniger Bruchfläche zu Bruche ging. Albert schloss daraus, dass das Eisen durch Kaltverformung zwar an Festigkeit gewinne, jedoch an Zähigkeit verliere und somit den Spannungswechseln nicht mehr genügend gewachsen war. Es gelang ihm innert nützlicher Frist nicht, durch weitere Ermüdungs-

versuche die Dauerfestigkeit der eisernen Ketten zu verbessern. An ihre Stelle traten damals die technisch weitgehend ausgereiften und von Albert erfundenen eisernen Drahtseile.

3.2 Untersuchungen über die an Postkutschen aufgetretenen Achsbrüche in Frankreich

Bild 2 zeigt die Konstruktion einer schmiedeisernen Achse (A–B) mit gusseiserner Hülse (a–b–c–d) bei einem sogenannten hölzernen Kalessenrad aus dem Jahre 1830. Auf der Hülse wird der sogenannte «hölzerne Haufen», das heisst die Nabe mit den hölzernen Speichen durch 3 Schrauben an der Scheibe (e–f) befestigt.

Im Lehrbuch über «Leçons de Mécaniques pratiques, Résistance des Matériaux» 1853 lässt A. Morin zwei qualifizierte Experten (ehemalige Artillerieoffiziere) zu Worte kommen, nämlich den Direktor beim Rollmaterial der Postwagen in Frankreich, M. Marcoux, und den zweiten, Verwalter des allgemeinen Post- und Transportwesens, M. Arnoux, die an verantwortlicher Stelle über langjährige Erfahrungen im Betrieb von Strassenfahrzeugen verfügen. Die damals vorherrschende Theorie von massgebenden Zeitgenossen, wonach sich das Eisen der Wagenachsen unter langzeitigen wechselnden Betriebsbeanspruchungen von zähen, sehnigem Gefüge in ein grobkörniges kristallines Gefüge verwandle, konnte von Marcoux nach mehr als 12jähriger Erfahrung nicht bestätigt werden. Weder Strukturänderungen im Eisen noch Vergröberungen im Bruchgefüge hatte Marcoux festgestellt.

Er war aber davon überzeugt, dass zu viele Betriebskilometer die Gefahr von Achsbrüchen erhöhe, und ordnete in einer Dienstvorschrift die Erneuerung der Achsen nach 60 000 km an. «Ich habe festgestellt», so berichtet er, «dass einwandfrei angefertigte Achsen aus Eisen guter Qualität nach einer Gesamtstrecke von 60 000–80 000 km brachen, weil sich am Bund der Achsschenkel kleine Risse bildeten, die ohne Erhitzung nicht erkennbar sind. Wenn die anfänglich nicht tiefgehenden Risse unbeachtet bleiben und sich bis zu einer Tiefe von 10–15 mm in den Schenkelhals fortpflanzen, entsteht mit Sicherheit der Achsbruch.» (Bild 3a)

Bild 1: Eine Relais-Station der Reisepost zwischen Paris und St-Etienne

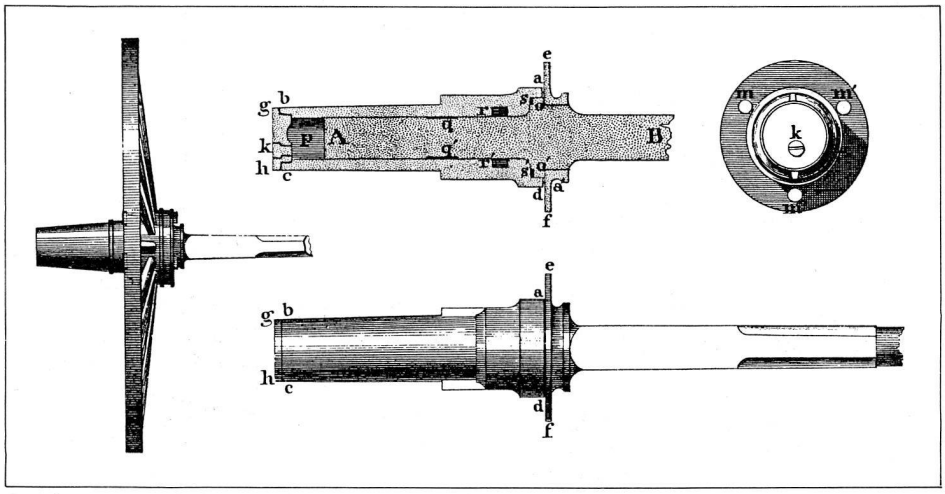


Bild 2

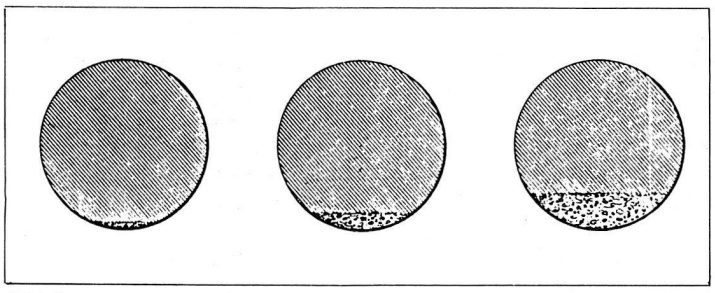


Bild 3a

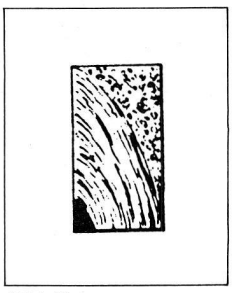


Bild 3b

Zu fast gleichen Feststellungen kommt Arnoux bei grösseren, gefederten dreiachsigen Postkutschen höherer Tragfähigkeit, deren Brüche an den beiden vorderen Achsen meistens im Längsdrittel zwischen den Rädern auftraten, bei der hinteren Achse aber im Bund der Achsschenkel, in allen 3 Fällen aber immer unter den Auflagestellen der Wagenladung (Bild 3b).

Nach einem Dienstjahr wurden die Wagen nach einer Kilometerleistung von 60 000–80 000 km (80–100 km/Tag) einer gründlichen Revision

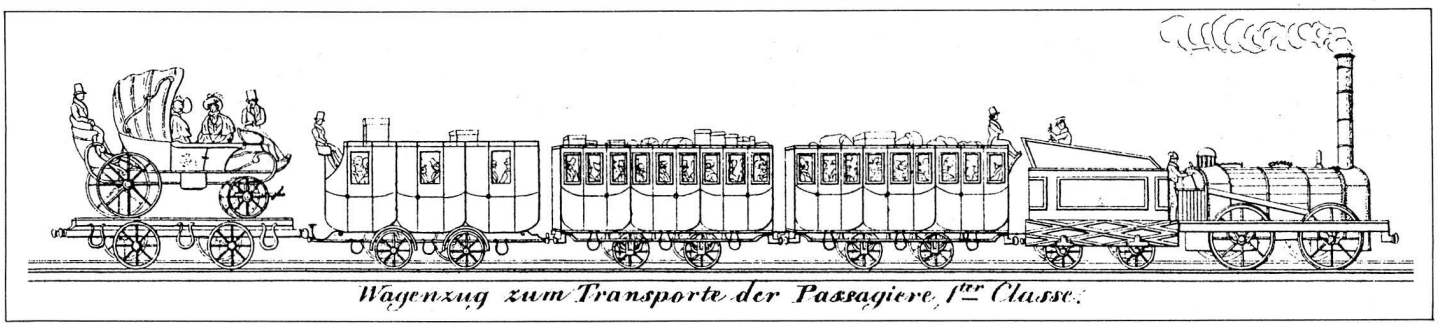


Bild 4

unterzogen und die kritische Bruchstelle – wenn noch nicht durchgebrochen – vorsorglich durch Feuerschweissen repariert. Im allgemeinen wurde beobachtet, dass die Fahrleistung einer Achse bis zum Bruch auf den gepflasterten «Routes Nationales» kürzer war als auf solchen von geschottertem Strassenbelag.

Die aus den langjährigen Erfahrungen gezogenen Schlussfolgerungen beider Experten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der schroffe Querschnittsübergang zwischen Achskörper und Achsschenkel mit grosser Kerbwirkung sind zu vermeiden, weil an dieser Stelle bevorzugt die Risse auftreten.
- Entsprechend den Traglasten, der Fahrgeschwindigkeit und Strassenbeschaffenheit sollen die Achsen spätestens nach einer Fahrstrecke von 70 000 km gegen neue ersetzt werden. Sie sind laufend zu warten.
- Von allen Massnahmen, die unternommen wurden, die Abnutzung (Verschleiss) an den Achsschenkeln zu vermeiden, erwies sich das Nachschmieden im Gesenk als die sicherste Methode. Die Achse war wieder so gut, als wäre sie nie im Gebrauch gewesen.

3.3 Ermüdungsrisse an Lokomotiv- und Eisenbahnachsen in England

Mit der starken Zunahme des Eisenbahnbaues in England nahm das Problem der Ermüdungsbrüche von Lokomotiv- und Wagenachsen bedrohliche Formen an (Bild 4).

Wenn man bedenkt, dass bereits 1850 etwa 200 000 Achsen bei den britischen Eisenbahnen in Betrieb standen, lässt sich auch die wirtschaftliche Bedeutung der damals zahlreich aufgetretenen Ausfälle *und* Unfälle durch Achsbrüche an Lokomotiven und Wagen ermessen. Bild 5* zeigt ein solches Eisenbahnwagenrad englischer Konstruktion um etwa 1830 mit Achslager (links). Alle Wagen englischer Eisenbahnen sind mit gusseisernen Rädern ausgerüstet, die auf schmiedeisernen Achsen festgekeilt sind. Die Nabe ist dreiteilig ausgebildet, um bei der Erstarrung während des Giessens in den Speichen und im Radkranz keine Spannungen zu erzeugen.

Rankine war wohl im Jahre *1843* der erste, welcher in seinem Bericht «On the causes of the unexpected breakages of the Journals of Railway Axles» den Bruchverlauf beschrieb, indem er festhält: «Der Bruch beginnt mit einem sehr kleinen, glatten Anriss, der sich rund um den Wellenzapfen ausbreitet und sich dann stufenweise von der Oberfläche in den Kern fortpflanzt. Scharfe Querschnittsübergänge begünstigen den Beginn des Ermüdungsbruches», und empfahl gleichzeitig, Querschnittsübergänge mit einem möglichst grossen Hohlkehlen-Radius zu versehen. Er schlug auch vor, die *Achsenrohlinge* schon beim Schmieden der Schulter mit einem grossen Radius auszubilden, um so einen gleichmässigen Faserverlauf im Übergang zu gewährleisten.

In verschiedenen Sitzungen wurde das Ermüdungsproblem auch 1849 in der Gesellschaft der Institution of Mechanical Engineers unter dem Vorsitz von Robert Stephenson eingehend erörtert, wobei der Bericht von James McConnell über «On Railway Axles» grosse Beachtung fand, aber auch Widersprüche unter den Teilnehmern hervorrief. Selbst bei sorgfältigster Herstellung der Achsen unterliegen dieselben einer raschen Zerstörung unter der Einwirkung von Vibrationen. Bei einigen Kategorien von Eisenbahnmaterial lassen sich sogar die Betriebskilometer voraussagen, bevor ein Riss

**Bilder 2 und 5 sind dem Bildband Nr. 32 des Handbuches der Mechanik, 1. Band «Mechanik fester Körper», Prag 1831, von Franz Joseph Ritter von Gerstner entnommen. (Im Besitze der Eisen-Bibliothek.)*

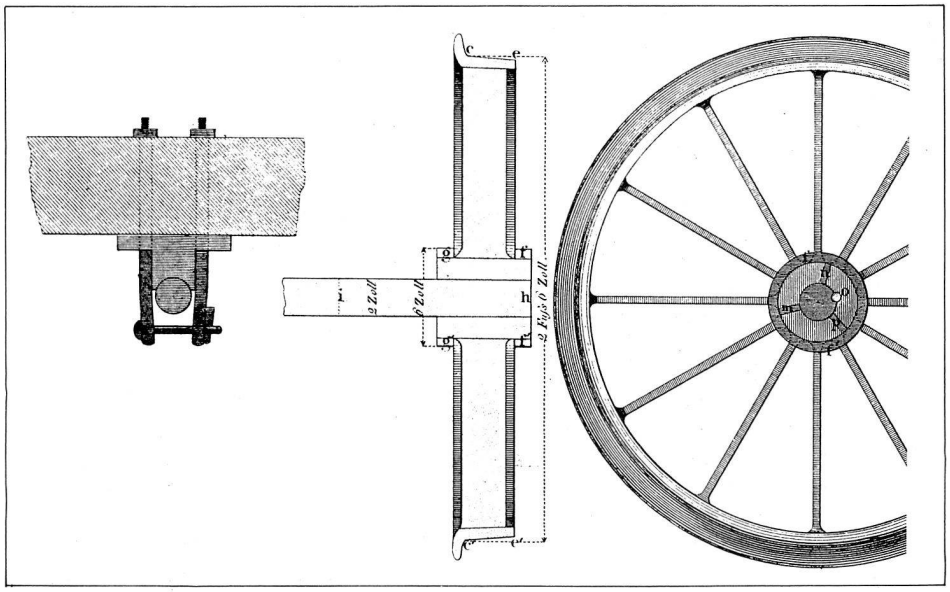


Bild 5

oder Bruch in Erscheinung tritt. Dass gewisse Veränderungen in der «Natur des Eisens» vor sich gehen, erachtet McConnell als eine gesicherte Tatsache, und er war überzeugt, dass der Übergang vom faserigen zum kristallinen Bruchaussehen von vielen Einflüssen abhängt. Er schliesst seine Betrachtungen mit der Feststellung: «Alle meine Erfahrungen haben erwiesen, dass viele der bisherigen Brüche sich vermeiden liessen, wenn die Achsschenkel ohne scharfe Übergänge, ohne zu grosse Unterschiede im Durchmesser zwischen Achskörper und Wellenzapfen oder lokale Unterschiede in der Festigkeit hergestellt werden könnten.» Vom Chairman Robert Stephenson selbst wurde in der nachfolgenden Diskussion bezweifelt, dass auf Grund seiner Experimente solche *«molekularen Veränderungen»* ihm als wahrscheinlich erscheinen.

Zum Schluss sei hier vollständigkeitshalber noch auf eine wichtige, grössere Versuchsreihe über Ermüdungsfestigkeit im Jahre 1849 verwiesen, die im Auftrag einer englischen Regierungskommission die Eignung von Schmiedeeisen für Eisenbahnbrücken zum Gegenstand hatte. Bei wiederholten Biegebeanspruchungen kann Schmiedeisen mit bis zu $1/3$ der dem *statischen* Bruch entsprechenden Maximaldurchbiegung ohne Schaden belastet werden. Treten aber zusätzlich noch Stösse oder Schwingungen *durch rollende Eisenbahnzüge* auf, so darf die grösste Belastung nicht mehr als $1/6$ der statischen Bruchlast betragen.

4. Zusammenfassung

4.1
Dass man Schwingungen, Stösse, Vibrationen, kurzum Ermüdungswirkungen, über längere Zeiträume in der Mitte des letzten Jahrhunderts nie als eine Aufeinanderfolge mehrerer oder vieler statischer Beanspruchungen verstanden hat, sondern in Serie ausgeübter Belastungen, kann wohl aus jeder der untersuchten Quellen entnommen werden.

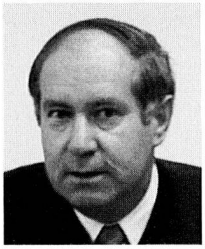
4.2
Es darf als erstaunlich angesehen werden, dass ohne grosse theoretische Vorkenntnisse der praktisch tätigen Ingenieure der Einfluss der *Kerbwirkung* scharfer Querschnittsübergänge bei wechselnder Belastung intuitiv erkannt worden ist.

4.3
Dass wechselnd beanspruchte Tragachsen von Eisenbahnen und Strassenfahrzeugen regelmässigen Revisionen zu unterziehen sind, also dem heute so geläufigen Begriff der sogenannten «Inservice Inspection» gleichzusetzen ist, dürfte auch schon damals dem Stand der Technik entsprochen haben.

4.4
Die immer wieder auftauchende Streitfrage «Verändern Bauteile aus Eisen und Stahl von anfänglich genügender Elastizität, Festigkeit und Zähigkeit ihr Gefüge derart, dass sie im Betrieb im neuen Zustand nicht mehr den bis anhin ausgesetzten Stössen und Spannungswechsel bruchfrei widerstehen», ist von den meisten Fachleuten jener Zeit verneint worden, vorausgesetzt, dass die Achsen nie über ihre «Fliessgrenze» hinaus beansprucht waren.

Die ausführliche «Bibliography on the Fatigue of Materials, Components and Structures» von 1838 bis 1950 von *J.Y. Mann,* Vol. 1–3, Pergamon Press, befindet sich im Besitze der Eisen-Bibliothek.

Zur Erfassung des Zusammenhanges zwischen innerer Beschaffenheit und mechanischem Verhalten von Eisenwerkstoffen



Dr. H.J. Koestler, Fohnsdorf (A)

Zu den frühen Darstellungen des Werkstoffprüfens sowie des Beurteilens der inneren Beschaffenheit von Stahl hinsichtlich seines späteren mechanisch-technologischen Verhaltens zählt das nebenstehende Bild aus G. Agricolas De re metallica[1].

Während im Hintergrund die Stahlherstellung gezeigt wird, härtet vorne bei einer Hammeranlage ein Schmied Stahlstücke, die er zuvor ausgeschmiedet hat, und «...zerbricht sie durch Schlagen mit dem Hammer. Nach dem Aussehen des Bruches beurteilt er, ob ein Teil noch wie (nicht härtbares) Eisen aussieht oder ob alles dicht geworden und in (härtbaren) Stahl verwandelt ist.» Die empirische Beziehung zwischen dem Gehalt an – seinerzeit noch unbekanntem – Kohlenstoff und der Härtbarkeit diente somit zur Ermittlung der spezifischen Brauchbarkeit von Stahl.[2]

Auf solche subjektiven Verfahren soll hier aber nicht weiter eingegangen werden, sondern auf Relationen zwischen *messbaren* metallkundlichen Kennwerten. Bisher bekannte Zusammenhänge dieser Art brachten – um die Schlussfolgerung vorwegzunehmen – trotz grossen, fallweise

enormen Aufwandes der praktischen Werkstoffprüfung jedoch nur unwesentlichen Gewinn, denn die Vielzahl der Parameter schliesst zielführende Berechnungen von Zugfestigkeit, Streckgrenze, Zähigkeitskriterien usw. selbst unter Verwendung genau