

Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG
Herausgeber: Eisenbibliothek
Band: 56 (1985)

Artikel: Theorie und Praxis in der Festigkeitslehre 1770-1830
Autor: Lang, Norbert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-378179>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Theorie und Praxis in der Festigkeitslehre 1770–1830

«Sag Freund, was ist Theorie?
Wenn's halten soll
und s'hält doch nie!
Und was ist Praxis?
Frag nicht so dumm:
Wenn's hält und keiner weiss warum!»

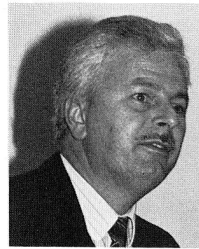
Dieser Spruch weist in etwas pointierter Form darauf hin, dass längst bevor es eine Wissenschaft der Statik und der Festigkeitslehre gab, Bauwerke von Praktikern errichtet worden waren, die Jahrhunderte lang Bestand hatten. Man denke dabei etwa an griechische Tempelbauten, römische Brücken oder an gotische Kathedralen. Aber auch Mühlen, Bewässerungsanlagen, Geschütze und Schiffe wurden gebaut, längst bevor eine eigentliche Theorie darüber existierte.

Die Kunst des intuitiven Erfassens der Werkstoffeigenschaften, das künstlerische Gestalten, die Überlieferung von Erfahrungen, welche in Traditionen eingebettet waren und nicht zuletzt der damals geringere wirtschaftliche Druck führten zu technischen Lösungen, die den gestellten Anforderungen bestens zu genügen vermochten.

Mit der Mathematisierung der Naturwissenschaft im 18. Jahrhundert fanden rechnerische Methoden zunehmend auch in den Ingenieurwissenschaften Eingang. Die Schaffung der polytechnischen Schulen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts beschleunigte den Übergang von den technischen Künsten zu eigentlichen Wissenschaften.

Die industrielle Revolution wurde durch Praktiker eingeleitet. Die erfolgreiche Kreation der Watt'schen Niederdruck-Dampfmaschine gelang gänzlich ohne Thermodynamik und Festigkeitslehre (Bild 1). Auch die ersten Umwälzungen im Verkehrswesen, Kanal-, Strassen- und Brückenbauten wurden von Praktikern realisiert. Erst der Eisenbahnbau, eng verknüpft mit der konsequenten

Norbert Lang,
BBC-Technikerschule,
Baden



Anwendung des Werkstoffes Eisen, evozierte wissenschaftlich gesicherte Bemessungsverfahren.

In der Übergangsphase, etwa von 1770–1830, koexistierten beide Richtungen. Während sich in England mehrheitlich Autodidakten mit dem Verhalten der Werkstoffe auseinandersetzten, entwickelte sich vorab in Frankreich die wissenschaftliche Festigkeitslehre. Wie stark etwa die Beurteilung der «Gegenseite» durch die Brille des persönlichen Standpunktes gefärbt war, zeigen die folgenden beiden Zitate:

Thomas Tredgold: «Die Standfestigkeit eines Bauwerks ist umgekehrt proportional zur Gelehrsamkeit seines Erbauers.»¹

Karl Culmann: «Jeder Praktiker stellt sich selbst am höchsten, sieht tief auf alle herunter, die er nicht beurteilen kann und würdigt sie keiner Aufmerksamkeit.»²

Stärker bemüht um gerechte Darstellung ist Navier. Er schreibt im Vorwort zu seinen an der Schule für Strassen- und Brückenbau gehaltenen Vorlesungen³: «Die meisten Konstrukteure bestimmen die Dimensionen der Teile von Bauwerken oder Maschinen nach dem herrschenden Gebrauche und nach dem Muster ausgeführter Werke; sie legen sich selten Rechenschaft ab über den Druck, welchen jene Teile aushalten

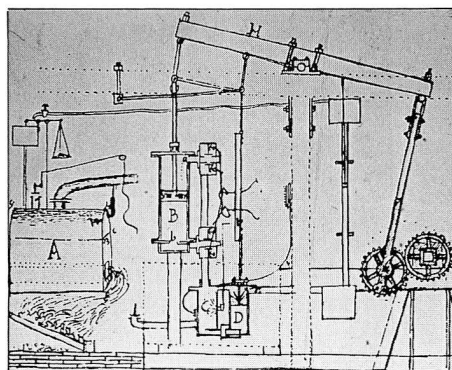


Bild 1: Doppeltwirkende Niederdruck-Dampfmaschine mit Balken-Balancier (Watt 1769)

müssen, und über den Widerstand, welchen sie demselben entgegenzusetzen. Dies mag wenig Nachteile haben, solange die auszuführenden Werke denen analog sind, welche man zu jeder Zeit errichtet hat, und sie, was die Dimensionen und die Belastungen anbetrifft, innerhalb der gewöhnlichen Grenzen bleiben. Aber man kann nicht mehr auf dieselbe Weise verfahren, wenn die Umstände dazu nötigen, jene Grenzen zu überschreiten, oder, wenn es sich um Bauwerke ganz neuer Art handelt, über welche die Erfahrung noch keine Resultate gesammelt hat.»

Französische Ingenieure widmeten sich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts intensiv der theoretischen Durchdringung der Festigkeits- und Elastizitätslehre. Dabei kamen ihnen fundierte Kenntnisse der Mathematik sehr zustatten. Genannt seien hier die Namen Coulomb, Poisson und Navier. Während dieser gleichen Epoche beschäftigten sich ihre englischen Berufskollegen mit Festigkeitsproblemen vorwiegend auf experimenteller Basis. Die Bücher von Tredgold, Barlow und Hodgkinson erlebten viele Auflagen und wurden auch in andere Sprachen übersetzt. Sie waren vor allem von den Praktikern geschätzt.

Todhunter kommentiert diese Werke etwas abschätzig: «Es ist bemühend, sich die auffallende wissenschaftliche Ignoranz der Praktiker vorzustellen, welche im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts in England am Werk waren. Man kann nur hoffen, dass in unserer Zeit eine engere Verbindung zwischen Theorie und Praxis bestehen möge.»⁴

Einen versöhnlicheren Ton schlägt Timoshenko an: «In dieser Periode der raschen industriellen Entwicklung wurde in England zur Verbesserung der Ingenieur-Ausbildung wenig getan. Die zahlreich auftretenden Ingenieuraufgaben wurden weitgehend von Autodidakten gelöst. Diese Leute besaßen wenig wissenschaftliche Kenntnisse und packten deshalb die Probleme von der empirischen Seite her an. Obwohl die experimentell gefundenen Resultate wenig zur allgemeinen Festigkeitslehre beitrugen, waren sie von den Praktikern geschätzt, wegen deren unmittelbaren Anwendbarkeit bei der Lösung praktischer Aufgaben.»⁵

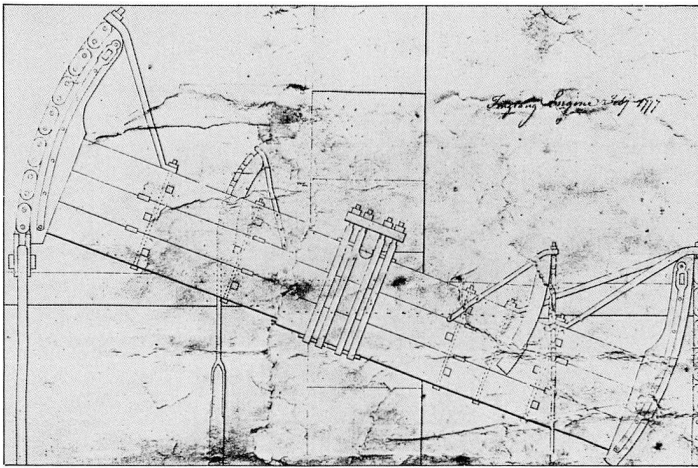


Bild 2: Balancier, aus verdübelten Holzbalken zusammengesetzt (Watt 1777)

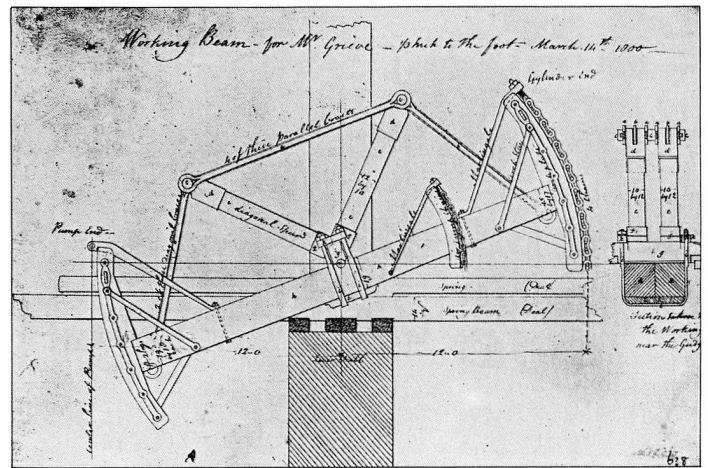


Bild 3: Fachwerk-Balancier (Watt 1800)

An einem Beispiel soll nachstehend gezeigt werden, wie meisterhaft James Watt sich an die werkstoffgerechte Durchbildung eines klassischen Maschinenteils heranwagte und schliesslich Lösungen fand, die noch 50 Jahre nach Watts Tod von den Lehrkanzeln der europäischen Polytechnika gepredigt wurden.

Die Metamorphose eines Maschinenteils

Die meisten von Watt gebauten Dampfmaschinen waren Balanciermaschinen. Die Anordnung, ursprünglich für Pumpmaschinen gebaut, wurde auch für Maschinen mit Drehbewegung übernommen. Der Balancier überträgt die Kolbenbewegung auf ein Pumpgestänge oder eine Kurbel. Dieser klassische Maschinenteil wurde bereits vor dem Dampfmaschinenzeitalter bei hydraulisch angetriebenen Gebläsen oder Pumpen verwendet. Auch die atmosphärischen Dampfmaschinen von Newcomen bis Smeaton wiesen hölzerne Balanciers auf. Der Balancier war der letzte ganz aus Holz hergestellte Bauteil der Dampfmaschine. Watt hat für dessen richtige Fertigung folgende Vorschrift erlassen:

«Der Balancier oder grosse Arbeitsbalken wird am besten aus einem einzelnen, gut gelagerten Eichenstamm hergestellt. Wenn dies nicht möglich ist, können zwei, vier oder mehr Balken dazu verwendet werden. Aus je weniger Teilen er zusammengesetzt ist, desto dauerhafter wird der Balken sein und entsprechend geringer seine benötigte Bauhöhe ... Auf keinen Fall dürfen in der Nähe des Drehzapfens Löcher in den Balken gebohrt werden oder irgend etwas

getan werden, was ihn an dieser Stelle schwächen würde.»⁶ (Bild 2). Dies beweist, dass Watt sowohl bezüglich Verlauf der Beanspruchung über die Balkenlänge als auch über die Wirkung von Kerben gut im Bilde war.

Matschoss berichtet von einer hundertjährigen Dampfmaschine mit hölzernem Balancier folgendes: «Es war höchst überraschend, diese Maschine in Betrieb zu hören: Sie ächzte und knackte wie ein alter Rohrsessel. Man mochte glauben, dass sie jederzeit zusammenbrechen würde. Doch stand sie seit nahezu 100 Jahren und verrichtete ihre Arbeit bestens.»⁷

Für doppelwirkende Maschinen waren die einfachen Holzbalanciers zu schwach. Watt erkannte dies und experimentierte mit fachwerkähnlich aufgebauten Doppelhebeln. 1784 schrieb er an seinen Teilhaber Boulton: «Unsere Balanciers mussten bisher bloss einer nach unten wirkenden Kraft widerstehen. Aber jetzt müssen grössere Kräfte in beiden Richtungen übertragen werden. Dazu genügt ein einzelner Balken nicht mehr und in Betracht der Länge auch mehrere verbundene Balken nicht, sofern nicht eine Bogen- oder Hängewerkkonstruktion angewandt wird.»⁸ (Bild 3). Die Idee zu dieser Konstruktion hat Watt wahrscheinlich bei Leupold⁹ gefunden (Bild 4), zu dessen Studium er bekanntlich die deutsche Sprache erlernt hatte. Auffällig ist jedoch die Tatsache, wie Watt klar erkannte, dass wechselnd beanspruchte Teile stärker dimensioniert werden müssen, als schwelend belastete.

Neben Leupolds Werken hat Watt auch die Bücher des Franzosen Belidor studiert. Dieser hatte in seinem Werk «La Science des Ingénieurs» Versuchsergebnisse über die Biegefestigkeit von Eichenholz publiziert.¹⁰

Zwangsläufig fand Eisen als Baustoff auch bald einmal beim Balancier Verwendung. Zuerst als Zugbänder und -anker für Verstrebungen, sodann für aufgeschraubte Verstärkungswangen auf hölzernen Balken. Watt unternahm umfangreiche Versuche an Modellen. Die Originalmodelle befinden sich im Science-Museum in London.

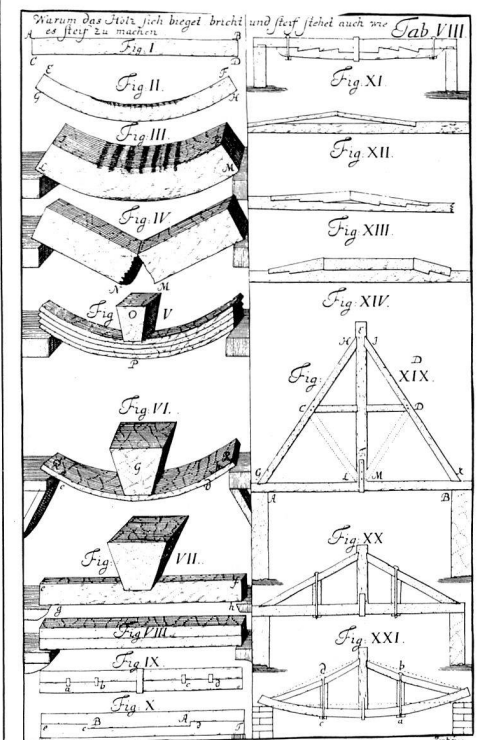


Bild 4: Balkenverstärkungen (Leupold 1726)

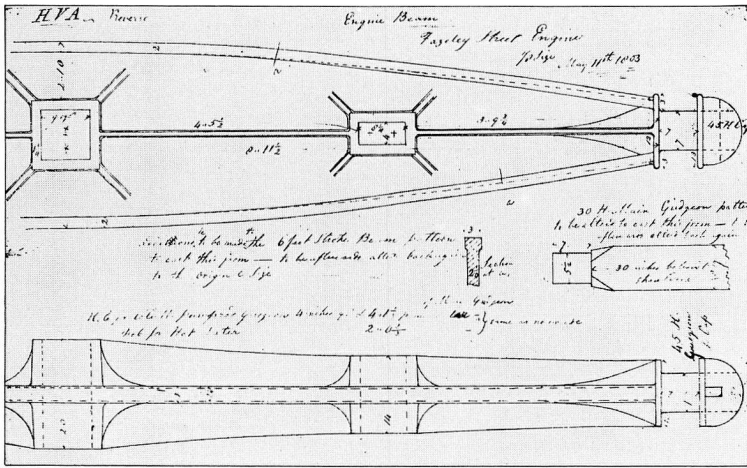


Bild 5: Gusseiserner Balancier (Watt 1803)

1800 stellte Watt den ersten Balancier ganz aus Gusseisen her. Dieser hatte den Querschnitt eines hochkant gestellten Rechtecks mit Verrippungen und Randwülsten (Bild 5). Das Längenprofil folgte dem Träger gleicher Festigkeit. Es war längst bekannt, dass der Biege widerstand dem Quadrat der Rechteckshöhe proportional zunahm. Watt pflegte hinsichtlich des gusseisernen Balanciers auch einen Erfahrungsaustausch mit dem Brückenbauer John Rennie.⁸

1822 schlägt Tredgold für gusseiserne Balken als geeignetsten Querschnitt das I-Profil vor. Er beschreibt dessen Vorteile mit folgenden Worten: «Das Material hat über den ganzen Querschnitt nahezu die gleiche Dicke, und die Partien, welche die stärksten Kräfte übernehmen und die grösste Steifigkeit ergeben, sind im grössten Abstand von der Biegeaxe entfernt. Diese Art Querschnitt wird für vielerlei Anwendungen gebraucht, so beispielsweise für den Balancier bei Dampfmaschinen.»⁹

Damit hatte der Balancier seine klassische Form erreicht, die auch in den folgenden Jahrzehnten nicht mehr verändert wurde. Selbst die ausgeklügelteste Festigkeitstheorie vermochte dieses ganz von Praktikern entwickelte Maschinenelement nicht weiter zu verbessern (Bild 6).

Der Balancier in den maschinen-technischen Fachbüchern

Das erste massgebende Lehrbuch über den Dampfmaschinenbau verfasste John Farey im Jahre 1827.¹¹ Über die zweckmässigsten Abmessungen der Maschinenteile schreibt Farey:

«Mr. Watt bestimmte die Abmessungen aller Teile seiner patentierten Rotationsmaschine in so scharfsinniger Weise, dass nach einer Praxis von wenigen Jahren im Bau dieser Maschinen er über die geeigneten Massverhältnisse für einen jeden Teil klar war und Normalien für die Abmessungen der Maschinen aller Grössen festsetzte. Nach diesen Abmessungen hat man sich, mit sehr geringen Abweichungen, seither von seiten der besten Ingenieure und Dampfmaschinenfabrikanten immer gerichtet, weil eine lange Erfahrung be-

wiesen hat, dass diese Normalien ausgezeichnet gewählt sind.»¹²

Unter Berufung auf Watt gibt Farey die Hauptabmessungen eines Balanciers aus Eichenholz wie folgt an:

$$l = 6 d$$

$$b = 0,5 d$$

$$h = 0,83 d$$

Es bedeuten:

l, b, h: Länge, Breite, Höhe des Balanciers

d: Bohrung des Arbeitszylinders

Alle Abmessungen sind als Verhältniszahlen zum massgebenden Zylinder

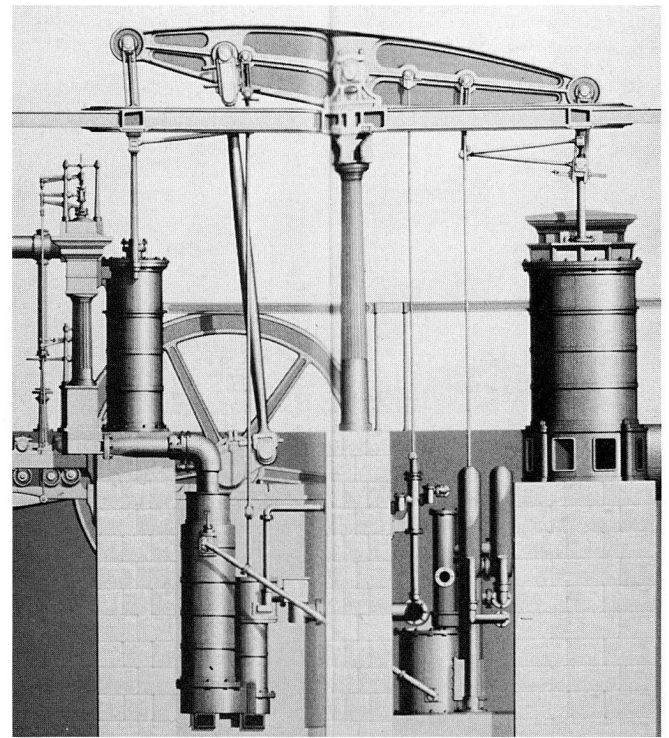


Bild 6: Dampfmaschine für Hochfengebläse mit Gusseisen-Balancier (um 1850)

Literaturverzeichnis

¹ T. Tredgold, *Practical Essay on the Strength of Cast Iron and other Metals*. 2nd Ed. London 1824, Seiten 3 und 5

² K. Culmann, *Der Bau der hölzernen Brücken in den Vereinigten Staaten von Nordamerika*. Allgemeine Bauzeitung, Wien, 16. Jg. 1851, Seite 74

³ L.M.H. Navier, *Résumé des leçons données à l'école des ponts et chaussées...* 2^e ed. Paris 1833, p. V

⁴ Todhunter/Pearson, *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials*. 3 vol., 1886–93, Reprint New York 1960, Seite 106

⁵ S.P. Timoshenko, *History of Strength of Materials*. New York 1953, Seite 123

⁶ Robinson/Musson, *James Watt and the Steam Revolution*. London 1969, Seite 128

⁷ C. Matschoss, *Die Entwicklung der Dampfmaschine*. Berlin 1908, Bd. 2, Seite 653

⁸ Dickinson/Jenkins, *James Watt and the Steam Engine*. London 1927, Seiten 201 und 202

⁹ J. Leupold, *Theatrum pontificiale oder Schauplatz der Brücken und des Brückenbaues*. Leipzig 1726

¹⁰ B.F. Belidor, *La science des ingénieurs dans les travaux de fortification*. Paris 1729

¹¹ J. Farey, *A Treatise on the Steam Engine*. London 1827

¹² E. Meyer, *Hat Watt sich zur Bemessung seiner Maschinenteile der Festigkeitslehre bedient? Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie*, Berlin 1 (1909) S. 108–117

¹³ T. Tredgold, *The Steam Engine, its Invention and progressive Improvement*. London 1838

¹⁴ A. Redtenbacher, *Resultate für den Maschinenbau*. Mannheim 1848, Seite 75

¹⁵ F. Reuleux, *Der Constructeur*. Braunschweig 1861, S. 244

derdurchmesser angegeben. Die Balancierlänge l ist durch die Anordnung der übrigen Elemente der Maschine (Geradföhrung, 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 ausgeföhrt.

Tredgold gibt hierfür an:

$$b = 0,0625 d \text{ (}^{13}\text{/S. 243)}$$

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 Redtenbacher¹⁴ und Reuleaux¹⁵ angegebenen Werte weichen nur unwesentlich von den oben aufgeföhrt 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.

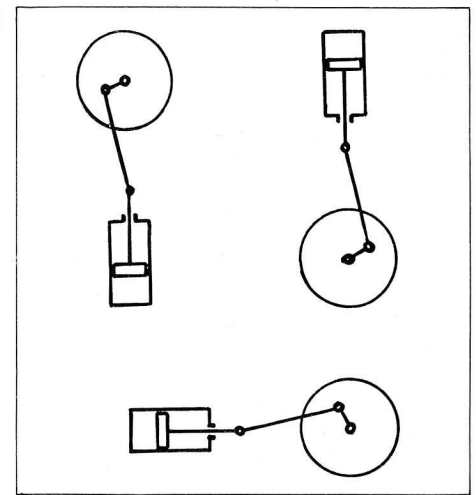


Bild 7: Neue Bauformen stationärer Dampfmaschinen (ab etwa 1870)

Von den Anfängen der Materialermüdung bei Metallen



Dipl. Ing. H. Lölting,
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 Reise-dienstes waren davon betroffen.

Betrachtet man die Darstellung über die zahlenmässige Entwicklung wissenschaftlicher Publikationen über die Ermüdungsfestigkeit von Metal-

len 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 Unter-

suchung 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 Fließsgrenze. Der undefinierbare Begriff der «Materialermüdung» wurde erstmals im Jahre 1853 vom Engländer F. Braithwaite eingeföhrt 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