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

Herausgeber: Eisenbibliothek

Band: 56 (1985)

Artikel: Zur Erfassung des Zusammenhanges zwischen inneren Beschaffenheit und mechanischem Verhalten von Eisenwerkstoffen

Autor: Koestler, H.J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-378181

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

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

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.

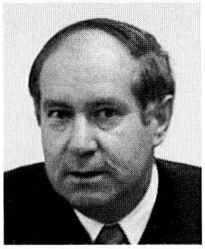
4.2
Es darf als erstaunlich angesehen werden, dass ohne grosse theoretische Vorkenntnisse der praktisch tätigen Ingenieure der Einfluss der *Kerbwirkung* scharfer Querschnittsübergänge bei wechselnder Belastung intuitiv erkannt worden ist.

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

bekannter Werte für die innere Beschaffenheit der betreffenden Werkstoffe aus.

In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts bemühten sich namhafte Forscher auf dem Gebiete von Metallkunde und Festigkeitslehre, aus dem (untereutektoiden) Kohlenstoffgehalt naturharter, unlegierter Stähle (Kohlenstoffstähle) auf deren Zugfestigkeit zu schliessen, wie dies Abbildung 1 veranschaulicht. Unter Anwendung linearer und quadratischer Ansätze entstanden Gleichungen, die nur den Kohlenstoffgehalt als einzige unabhängige Variable enthalten und auch deshalb zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die vor kurzem ermittelte Zugfestigkeit einer 1883 in Kärnten erzeugten Eisenbahnschiene aus Bessemerstahl (B 1883[4]) entspricht dem nach Weyrauch berechneten Wert allerdings sehr gut, während dies zum Beispiel für die wesentlich jüngeren Stähle C 45 und C 60 (mit verhältnismässig hohem Mangangehalt) nicht der Fall ist.

Es fehlte auch nicht an Bemühungen, den Einfluss einer Wärmebehandlung auf den Zusammenhang zwischen Kohlenstoffgehalt und Zugfestigkeit beziehungsweise Streckgrenze sowohl bei unter- als auch bei übereutektoiden Kohlenstoffstählen zu berücksichtigen (Abbildung 2). Für den gehärteten Zustand soll demnach bei Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt bis 0,8% eine lineare Abhängigkeit bestehen; dies entspricht jedoch nicht dem heutigen Stand der Kenntnisse, denn a) geht die ohnehin nicht exakte Linearität ab etwa 0,5% Kohlenstoff verloren und b) liegt die erreichbare Höchsthärte bei 66 HRC, das heisst weit über der hier angegebenen höchsten Zugfestigkeit.
Bei geglühten Stählen fand A. Saveur im Gegensatz zu H. Jüptner-Jonstorff und W. Müller im übereutektoiden Bereich ebenfalls eine lineare Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Kohlenstoffgehalt.

Im Zuge der Auswertung von Ergebnissen der Festigkeitsprüfung bei Schienenstählen versuchte A. Saveur erstmals, die Korngrösse (durchschnittliche Kornfläche im metallographischen Schliff) in seine Betrachtungen einzubeziehen (Abbildung 3). Danach ergab sich zwischen Kornfläche und Zugfestigkeit beziehungsweise Bruchdehnung wieder ein linearer Zusammenhang, über dessen Bestimmtheitsmass keine Mitteilungen vorliegen.

Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Stahl – oder richtiger: der wichtigsten Elemente – auf seine Zugfestigkeit war oft Gegenstand umfangreicher Erprobungen.[7] Untenstehende Tabelle enthält einige dieser auf den ersten Blick sehr praktischen Formeln, doch zeigt sich bald, dass wesentliche Parameter unberücksichtigt blieben oder als konstant vorausgesetzt wurden, zum Beispiel Warmformgebung und Wärmebehandlung; das Erschmelzungsverfahren hingegen fand über davon abhängige Beiwerte beziehungsweise Einschränkungen der Gültigkeit einiger Formeln Eingang in diese Berechnungsmethode. Obwohl heute der Ermittlung von Festigkeits- und/oder Zähigkeitswerten aus der chemischen Analyse kaum Bedeutung zukommt, waren die «Peiner Formel»[9] und die «Neuberger Formel»[10] längere Zeit offenbar erfolgreich in Gebrauch. Als führende Persönlichkeit in der Frage «chemische Zusammensetzung/mechanische Werte von Stahl» galt H. Jüptner-Jonstorff (1853–1941), der in Neuberg und in Donawitz (Steiermark) sowie schliesslich als Professor an der Technischen Hochschule in Wien gewirkt hat.

Eine Möglichkeit, die innere Beschaffenheit von (siliziumreichem) Gusseisen teilweise zu erfassen, bietet sich in der Feststellung des Sättigungsgrades S_c, wie ihn H. Hanemann und A. Schrader[11] angegeben haben (Abbildung 4). Mit zunehmendem Sättigungsgrad nimmt die Zugfestigkeit grauen Gusseisens ab, wobei aber ein ziemlich breites Streuband auftritt, denn auch hier wäre der Einfluss vieler anderer Parameter (zum Beispiel der Phosphorgehalt) zu berücksichtigen.

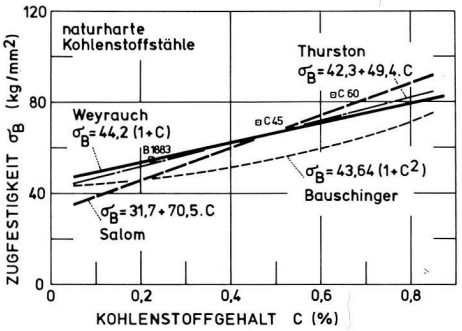


Abbildung 1: Einfluss des Kohlenstoffgehaltes naturharter, unlegierter Stähle (Kohlenstoffstähle) auf ihre Zugfestigkeit. Nach H. Jüptner-Jonstorff.[3] (Die heute nicht mehr üblichen Bezeichnungen für Spannungen und ihre Dimensionen wurden hier sowie in den folgenden Abbildungen beibehalten).

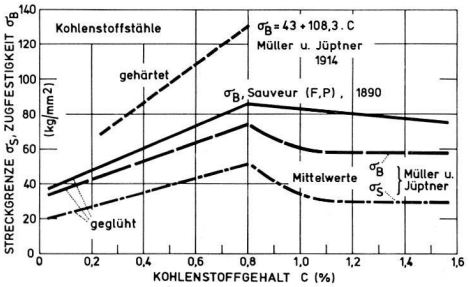


Abbildung 2: Einfluss des Kohlenstoffgehaltes unlegierter Stähle (Kohlenstoffstähle) auf ihre Zugfestigkeit bzw. Streckgrenze nach unterschiedlicher Wärmebehandlung. Nach H. Jüptner-Jonstorff.[5]

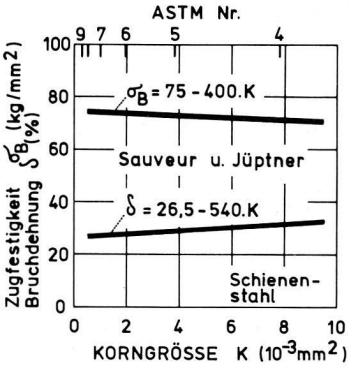


Abbildung 3: Einfluss der Korngrösse auf Zugfestigkeit und Bruchdehnung eines Schienenstahles. Nach H. Jüptner-Jonstorff.[6]

Autor	ZUGFESTIGKEIT σ_B (kg/mm²) Elemente %	Anm.
Osmond	26 + 60.C + 23.Mn + 11.Si + 65.P	Bess.-Stahl
Demage	24,4 + 56,2.C + 19,1.Mn – 10,4.Mn + f(C)P	–"– (<C)
Campbell	26,3 + 66,7.C + 6.Mn + 73.P + $R_{s,b}$	—
Jüptner	25 + 66,7.C + 14,5.Mn + 28,6.Si	Bess.-Stahl

Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der chemischen Zusammensetzung des Stahles. Nach H. Jüptner-Jonstorff.[8]

Die bisher erörterten Abhängigkeiten beruhen im wesentlichen auf empirischen Erkenntnissen. Erst zu Anfang der dreissiger Jahre ergibt sich mit Entdeckung und Deutung gewisser Baufehler im Kristallgitter, der sogenannten Versetzungen, eine neue Dimension im Problemkreis «innere Beschaffenheit/mechanische Eigenschaften von Metallen.» In Abbildung 5 ist eine Stufenversetzung in einem einfach-kubischen Raumgitter dargestellt: eine Gitterebene endet *im* Gitter und ruft eine Stelle erhöhter Energie hervor. Versetzungen ermöglichen - vereinfacht ausgedrückt - eine plastische Verformung bei viel geringeren äusseren Spannungen, als es die Theorie für den fehlerfreien Kristall erwarten lässt.

Nach A.H. Cottrell und N.J. Petch werden Versetzungen durch Spannungen, die deutlich kleiner als die Streckgrenze sind, von ihren interstitiellen Verankerungen losgerissen und wirken als Quelle neuer Versetzungen, die sich an der Korngrenze (eines Kristalliten mit dem Durchmesser d) aufstauen. Dadurch entsteht im Nachbarkristalliten bei A ein Spannungsfeld, dessen Ausbildung von der äusseren Spannung σ und der den Versetzungen entgegenwirkenden Spannung σ_i abhängt. Ein Abgleiten (Verformen) bei A setzt ein, wenn die Gesamtspannung gleich der Losreissspannung σ_L geworden ist. Vereinfachungen und mathematische Umformungen führen zu einer als Gerade darstellbaren Funktion zwischen unterer Streckgrenze und Korndurchmesser; E.O. Hall und N.J. Petch gaben diesen in der Literatur als Hall-Petch-Beziehung bezeichneten und experimentell oft bestätigten Zusammenhang erstmals 1951/53 an. Als Beispiel für die Hall-Petch-Beziehung seien Untersuchungen an dem Baustahl St 52.3 von W. Dahl und Mitarbeitern[13] herausgegriffen (Abbildung 6); es zeigte sich, dass die lineare Beziehung auch bei tiefen Temperaturen und für mehrphasige Gefüge (Ferrit und Perlit) gilt, sofern eine Phase (hier Ferrit) mengenmässig überwiegt.

Anhand einiger Beispiele wurde dargelegt, dass es bislang nicht gelungen ist, brauchbare, an der praktischen Werkstoffprüfung orientierte und über grössere Bereiche gültige Formeln, Diagramme oder Nomogramme zu entwickeln, die ausreichend viele Einflussfaktoren auf mechanisch-technologische Eigenschaften der Eisenwerkstoffe enthalten. Darüber hinaus erweist es sich oft als unmöglich, einen bestimmten Einflussfaktor zahlenmässig zu beschreiben oder auszudrücken. Als solches Beispiel sei der Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen[14] (oxidischer und/oder sulfidischer Reinheitsgrad) genannt, der sich mit den sogenannten K- und M-Werten[15] erfahrungsgemäss nur unbefriedigend erfassen lässt.

Demgemäss bleibt nach heutigem Forschungsstand nichts anderes übrig, als die jeweilige normgerechte Prüfung durchzuführen, wenn die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung, die Kerbschlagzähigkeit usw. von Stahl oder Gusseisen ermittelt werden sollen.

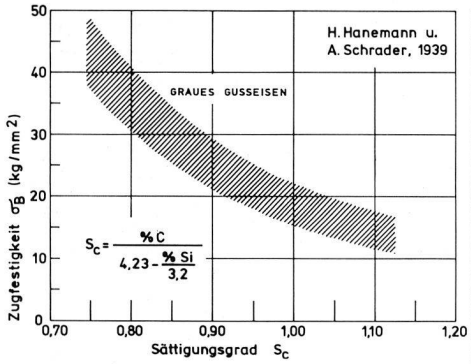


Abbildung 4: Einfluss des Sättigungsgrades auf die Zugfestigkeit grauen Gusseisens. Nach H. Hanemann und A. Schrader.[11]

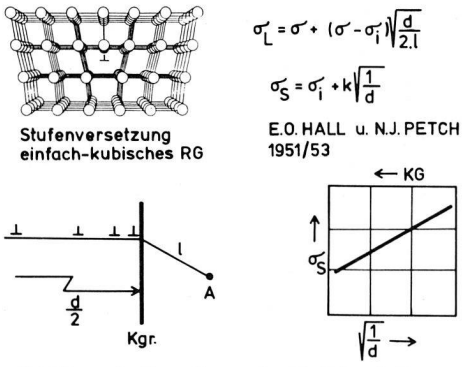


Abbildung 5: Grundlagen der Hall-Petch-Beziehung (weitere Erklärung im Text). Teilweise nach E. Macherauch.[12]

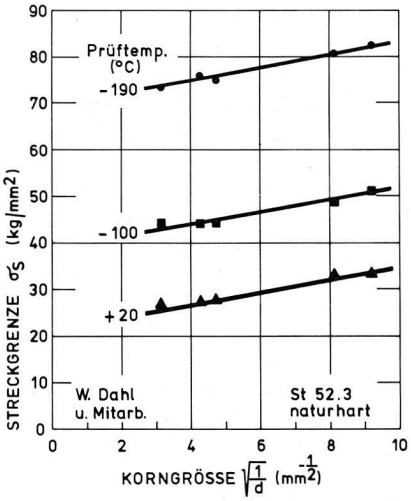


Abbildung 6: Einfluss der Korngrösse auf die Streckgrenze des naturharten Stahles St 52.3. Nach W. Dahl und Mitarb.[13]

Anmerkungen

[1] *Georg Agricola: Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen (1556). Übersetzt und bearbeitet von Carl Schiffner. 3. Aufl., Düsseldorf 1961. S. 368-369*

[2] *Vor allem der für Gärbstahl verwendete Frischherdstahl (Rohstahl) wurde einer mehrmaligen, genauen Kontrolle auf Gefüge und dessen Homogenität unterzogen. Vgl. Hans Jörg Köstler: Die Herstellung von Gärbstahl aus Frischherdstahl in den ehemaligen Innerberger Hammerwerken. In: Radex-Rundschau 1976, S. 814-827*

[3] *Hans Jüptner-Jonstorff: Beziehungen zwischen den mechanischen Eigenschaften, der chemischen Zusammensetzung, dem Gefüge und der Vorbehandlung von Eisen und Stahl. Sammlung technischer Forschungsergebnisse, 2. Bd. 2. verb. Aufl., Leipzig 1919. S. 1 (hier auch weiterführende Literatur)*

[4] *Hans Jörg Köstler: Werkstoffkundliche Untersuchung einer Eisenbahnschiene aus Buchscheiden (Kärnten). In: Carinthia II 170/90 (1980), S. 123-131*

[5] *Hans Jüptner-Jonstorff: Beziehungen zwischen den mechanischen Eigenschaften... S. 3-6*

[6] *Hans Jüptner-Jornstorff: Beziehungen zwischen den mechanischen Eigenschaften... S. 44-48*

[7] *Hans Jüptner-Jontorff: Beziehungen zwischen der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften von Stahl. Leipzig 1896*

[8] *Hans Jüptner-Jonstorff: Beziehungen zwischen den mechanischen Eigenschaften... S. 7-15*

[9] *Benannt nach dem Stahl- und Walzwerk in Peine (Bundesrepublik Deutschland)*

[10] *Benannt nach dem Hüttenwerk in Neuberg a.d. Mürz (Österreich)*

[11] *Heinrich Hanemann und Angelika Schrader: Beziehungen zwischen Gefüge und Zugfestigkeit des grauen Gusseisens. In: Archiv Eisenhüttenwes. 12 (1938), S. 253-256*

[12] *Eckard Macherauch: Die plastische Verformung von Vielkristallen. In: Zeitschrift f. Metallkunde 55 (1964), S. 60-82*

[13] *Winfried Dahl, Helmut Hengstenberg und Hubertus Behrens: Das Verhalten unlegierter und niedriglegierter Baustähle an der Streckgrenze in Abhängigkeit von Korngrösse, Temperatur, Vorverformung und Alterung. In: Stahl u. Eisen 87 (1967), S. 1030-1047*

[14] *Hans Diergarten: Gefüge-Richtreihen im Dienste der Werkstoffprüfung in der stahlverarbeitenden Industrie. 4. Aufl., Düsseldorf 1960*

[15] *Mikroskopische Prüfung von Edelstählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen. Stahl-Eisen-Prüfblatt 1570; 2. Ausg., Düsseldorf 1971*