

Rechnerische Ermüdungsnachweise
für geschweißte Bauteile

Dr.-Ing. Peter Knödel, SFI/IWE
ö. b. u. v. Sachverständiger (IHK KA) für
Schweißtechnik – Sonderbauten in Metall
www.peterknoedel.de

Fortbildung für Schweißaufsichtspersonen
25.-26.01.2006
Gruppe 3 Stahlbau

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mannheim GmbH
Käthe-Kollwitz-Str. 19, D-68169 Mannheim
www.slv-mannheim.de

0. Inhalt

0.	Inhalt	2
1.	Vorwort	3
2.	Namen und Geschichten	4
3.	Begriffe	6
4.	Einflußgrößen	8
4.1	Lasten	8
4.1.1	Allgemeines	8
4.1.2	Zeitlich veränderliche Belastung	8
4.1.3	Mehrachsige Belastung / Beanspruchung	10
4.1.4	Kollektive	13
4.1.5	Lineare Schadensakkumulation	14
4.1.6	Belastungsfrequenz	16
4.2	Werkstoff	16
4.3	Geometrie	20
4.4	Oberflächenzustand	24
4.5	Eigenspannungen	25
4.6	Zusammenfassung	27
5.	Rechenverfahren	30
5.1	Nennspannungskonzept	30
5.2	Kerbspannungskonzept	30
5.3	Bruchmechanik	31
6.	Regelwerke	32
7.	Offene Fragen	34
8.	Literatur	35
8.1	Normen, Regelwerke, Richtlinien	35
8.2	Standardwerke und Klassiker	36
8.3	Fachliteratur	37

1. Vorwort

Meine ursprüngliche Idee bei der Konzeption des Vortragsthemas war es, „eben mal schnell“ in einem 60- bis 90-minütigen Vortrag den derzeitigen Stand der Technik sowie die neuesten Entwicklungen der Wissenschaft zum Thema

„Rechnerische Ermüdungsnachweise für geschweißte Bauteile“
übersichtlich strukturiert zusammenzustellen.

Bereits bei der Aufarbeitung der Grundlagen – nämlich der maßgebenden Einflußgrößen – musste ich erkennen, daß dieses Fachgebiet, auf dem ich mich seit langem mit Freude bewege, derart komplex ist, daß im Rahmen der hier zur Verfügung stehenden Zeit schon die Grundlagen nur ziemlich oberflächlich umrissen werden können. Erst recht ist es in diesem Rahmen unmöglich, die vielen Rechenverfahren, d.h. Ansätze zur quantifizierenden Beschreibung des Phänomens „Ermüdung metallischer Werkstoffe“ aufzuzählen oder gar deren Finessen darzustellen und gegeneinander abzuwägen.

Auf der anderen Seite ist klar, daß wenn der Ingenieur in wissenschaftlichem Sinne die wesentlichen Einflußgrößen so verstanden hat, daß sie einer – aus Sicht des Werkstoffwissenschaftlers möglicherweise groben – aus Sicht des planenden oder begutachtenden Ingenieurs jedoch genügend genauen Beschreibung zugänglich sind, er auch weiß, was im jeweiligen Fall zu rechnen ist, um der gesuchten Wirklichkeit genügend nahe zu kommen. Die Schwerpunkte des Vortrages haben sich daher gegenüber der ursprünglichen Absicht verschoben und liegen jetzt mehr auf der Beschreibung und Erläuterung der Einflußgrößen als auf den daraus abgeleiteten Rechenrezepten.

Zitat:

90 % aller versagenden Teile sind auf Ermüdungsschäden zurückzuführen, so eine Studie des amerikanischen Energieministeriums. Blick durch die Wirtschaft, 02.12.1997, zitiert nach Rother / Wang / Rust (1998) in [58].

Anm. d. Verf.: Es könnte aber sein, daß damit nur „versagende Teile“ im Bereich der amerikanischen Energiewirtschaft gemeint sind.

Anmerkung:

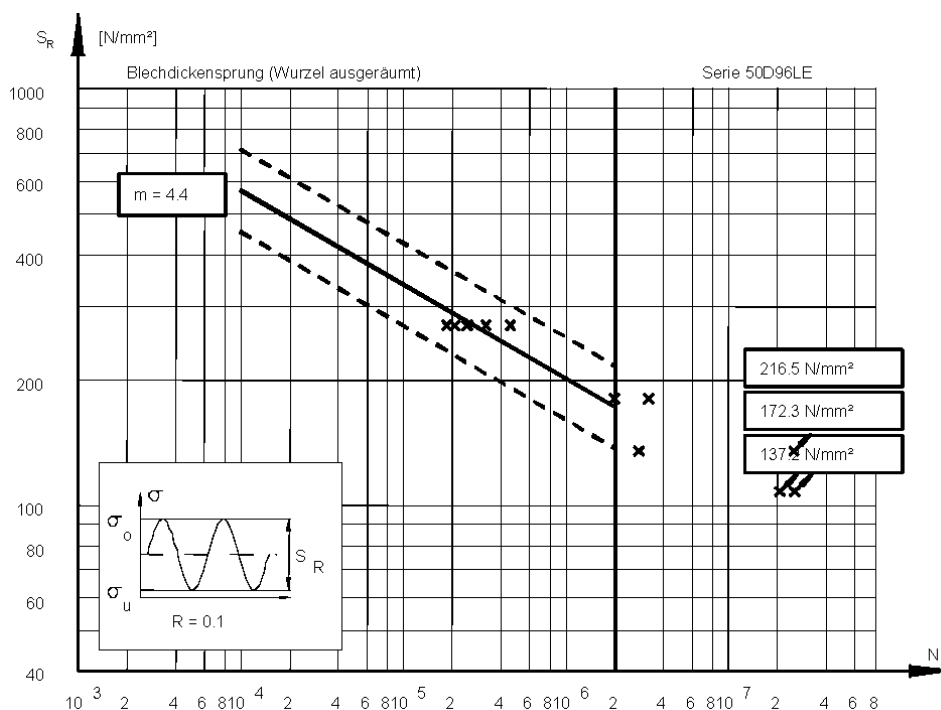
Das vorliegende Skript wurde gegenüber der am 26.01.06 von der SLV-Mannheim verteilten Fassung inhaltlich ergänzt und redaktionell überarbeitet. Ich bedanke mich bei der SLV-Mannheim für die Veröffentlichungsgenehmigung.

2. Namen und Geschichten



August Wöhler

August Wöhler, geb. am 22.06.1819 in Soltau (Lüneburger Heide), gest. am 21.03.1914 in Hannover, untersuchte als erster ca. 1860 systematisch gebrochene Eisenbahnachsen [32] und gilt daher als Vater der Materialermüdung (1901 Dr.-Ing. e.h. durch TU Berlin). Tatsächlich gibt es bereits seit 1820 einzelne Erkenntnisse anderer Forscher über „Materialermüdung“.



Wöhlerlinie für eine Stumpfnah mit Blehdickensprung, S960

(Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe, 2006 [53])

Die Wöhlerlinie beschreibt die ertragbare Zyklenzahl (=Bruchlastspielzahl) eines (metallischen) Werkstoffes bei Beanspruchung zwischen immer der gleichen Ober- und Unterspannung, d.h. in einem sogenannten Ein-Stufen-Kollektiv. Sie verknüpft in doppeltlogarithmischem Maßstab die Spannungsausschläge auf der y-Achse mit der Zyklenzahl auf der x-Achse.

Quellen zu Wöhler:

www.tu-berlin.de/presse/125jahre/festschrift/woehler_e.htm (14.01.06)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Wöhlerversuch>

Die Arbeiten von A. Palmgren (1924) [28] und M.A. Miner (1945) [27] gelten heute als Grundlage der „Linearen Schadensakkumulations-Hypothese“ (hierauf wird im folgenden Text noch näher eingegangen).

(Die Geschichte der Bruchmechanik wird hier nicht beleuchtet.)

Zeitgenössische Namen, die einem bei Literaturstudien häufig begegnen, sind (subjektive Auswahl):

Erwin Haibach, LBF Darmstadt;

Adolf F. Hobbacher, FH Wilhelmshaven;

T. Seeger, LBF Darmstadt;

Cetin Morris Sonsino, LBF Darmstadt;

Das „LBF Darmstadt“ heißt offiziell:

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt (früher Laboratorium für Betriebsfestigkeit), www.lbf.fraunhofer.de .

3. Begriffe

Ich möchte an dieser Stelle einige Begriffe definieren bzw. kommentieren, die häufig im Zusammenhang mit Materialermüdung verwendet werden.

„nicht vorwiegend ruhende Belastung“

... ist eine gute Definition, nur die Negativ-Beschreibung gefällt mir nicht

„schwingende Belastung“

... ist im Bauwesen meistens völlig unzutreffend, es sei denn, wir betrachten einen Stahlschornstein unter karmanscher Wirbelerregung im Resonanzzustand;

... aber auch im Maschinenbau: die sinusförmigen Änderungen der Beanspruchung in einer umlaufend gebogenen Welle sehen zwar aus wie eine Schwingung, aber die Welle schwingt doch nicht!

„zyklische Belastung“

... paßt eigentlich nur, wenn die Belastung tatsächlich zyklisch erfolgt. Unter Zyklen versteht man Zeitabschnitte etwa gleicher Länge, in denen etwa das gleiche passiert. Demzufolge paßt „zyklische Belastung“ weder für Brücken noch für Krane.

„dynamische Belastung“

... ist ganz falsch, weil Dynamik etwas mit Massenträgheiten und Kräften zu tun hat.

„veränderliche Belastung“

... ist nicht schlecht, aber eigentlich zu einschränkend – auch im Zugversuch bringt man eine veränderliche Belastung auf den Probekörper

„häufig veränderte Belastung“

... ist meiner Ansicht nach der beste Begriff

„Dauerschwingversuch“

... halte ich für einen zutreffenden Begriff, weil die Probe aus prüftechnischen Gründen tat-

sächlich mit sinusförmig veränderlichen Lasten beansprucht wird, sie wird also im weitesten Sinne – vor allem bei relativ hohen Prüffrequenzen – schwingend belastet.

Hinweis:

Selbstverständlich habe auch ich in jungen Jahren häufig und mit Begeisterung die Begriffe „schwingende Belastung“ und „dynamische Belastung“ verwendet. Die Begriffe klingen ja auch sehr gut!

4. Einflußgrößen

4.1 Lasten

4.1.1 Allgemeines

Mit Ermüdung bezeichnet man ein Phänomen, das nur bei mehrfach oder häufig veränderter Belastung eines Bauteiles auftritt.

Zeitabhängig veränderliche Tragfähigkeit eines Bauteiles unter unveränderter Last bezeichnet man als Kriechen oder Relaxieren, wenn die Höhe der ertragbaren Last gemeint ist oder als Alterung, wenn Duktilitätsverlust, d.h. Zunahme der Spröde gemeint ist.

4.1.2 Zeitlich veränderliche Belastung

Da die ersten Ermüdungsbrüche aus dem Bereich des Maschinenbaus stammen, z.B. Generator- oder Turbinenwellen, Eisenbahnachsen, war die Beschreibung der Lasteinflußgrößen sehr einfach: Bei umlaufender Biegebelastung ist der Last-Zeit-Verlauf in einer bestimmten (mitgedrehten) Faser des Bauteils sinusförmig. In der betrachteten Faser entstehen aus der Umlaufbiegung Normalspannungen, die zwischen einem betragsgleichen Maximal- und Minimalwert variieren. Die Mittelspannung ist daher Null, der Größtwert der auftretenden Spannung ist gleich der Spannungsamplitude. (Schubspannungen werden vernachlässigt). Man bezeichnet diesen Zeitverlauf als „Wechselbeanspruchung“.

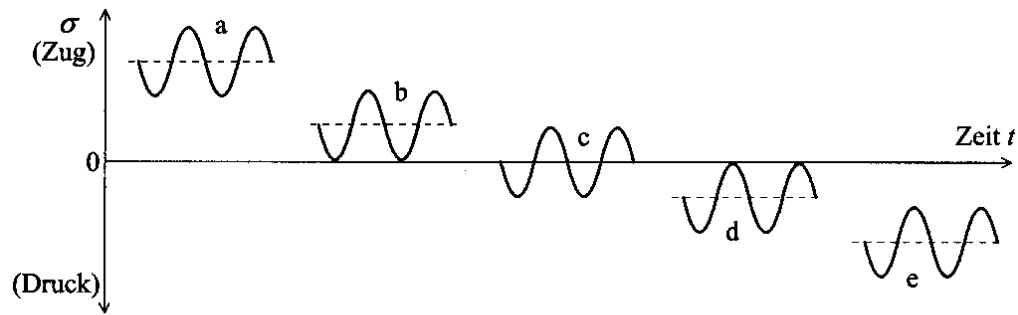


Abb. 8-2 Beanspruchungsbereiche

Beanspruchungsbereiche nach Abb. 8-2:

- a Zugschwellbeanspruchung $\sigma_o > 0; \sigma_u > 0$
- b reine Zugschwellbeanspruchung $\sigma_o > 0; \sigma_u = 0$
- c Wechselbeanspruchung $\sigma_o / \sigma_u < 0$
- d reine Druckschwellbeanspruchung $\sigma_o < 0; \sigma_u = 0$
- e Druckschwellbeanspruchung $\sigma_o < 0; \sigma_u < 0$

Wechselbeanspruchung – Linie c

(aus Seeßelberg 2005 [57])

Eine Stufe komplizierter wird die Charakterisierung der Last, wenn die Mittelspannung nicht gleich Null ist.

Beispiel 1: Kranbrücke

Die Unterseite der Kranbrücke erfährt schon durch das Eigengewicht der Kranbrücke eine konstante Zugbeanspruchung (wenn man z.B. das Wippen der Kranbrücke vernachlässigt). Durch das Hin- und Herfahren der Katze mit der Nennlast wird eine weitere, veränderliche Zugspannung überlagert.

Beispiel 2: Zweifeldriger Kranbahnträger

Die Unterseite des Kranbahnträgers in Feld 1 erfährt eine (hohe) Zugspannung wenn das Fahrwerk der Kranbrücke in der Mitte von Feld 1 steht. Wenn die Kranbrücke im Feld 2 steht, treten an der Unterseite von Feld 1 Druckspannungen auf. Die Beanspruchung wechselt das Vorzeichen.

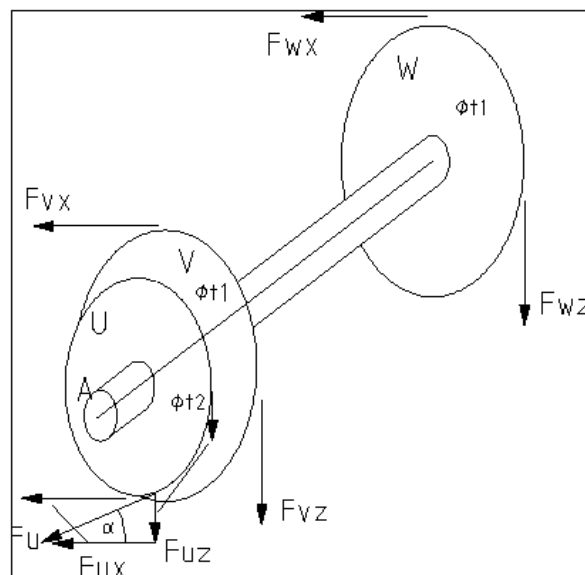
Der zeitliche Spannungsverlauf in den beiden Beispielen läßt sich charakterisieren durch die Wertepaare Oberspannung / Unterspannung, oder durch Oberspannung / Spannungsverhältnis R, wobei R als Verhältnis von Unterspannung zu Oberspannung definiert ist.

Rein rechnerisch kann man natürlich auch hier eine Mittelspannung und eine Spannungs-„Amplitude“ angeben, das führt meiner Ansicht nach aber zu einem falschen Bild im Kopf, da es einen zyklischen Belastungsverlauf suggeriert.

Neben diesen Beispielen gibt es noch eine Menge anderer Bauteile oder Konstruktionen, die tatsächlich einer regellosen Beanspruchung unterliegen, z.B. Straßenbrücken, Baumaschinen und Konstruktionen, die dem Wind ausgesetzt sind (ohne Betrachtung von wirbelerregten Querschwingungen, diese werden wieder regelmäßig-zyklisch-harmonisch).

4.1.3 Mehrachsige Belastung / Beanspruchung

Schon bei Bauteilen mit vermeintlich sehr einfachem statischen System können unerwartet komplizierte Kombinationen von Belastungen auftreten.

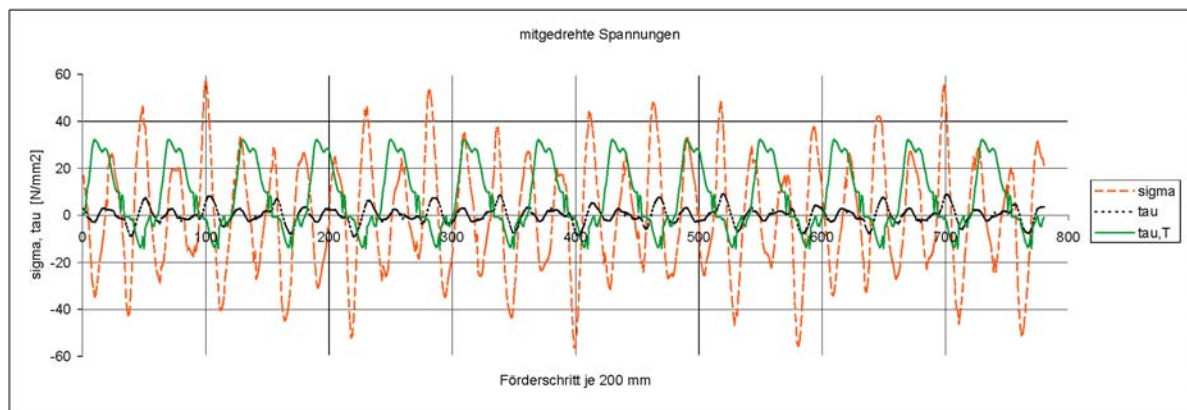


Antriebswelle (schematisch)

Die in der Skizze gezeigte Antriebswelle aus einem Rohr mit Durchmesser ca. 200 mm für zwei Förderketten ist an den beiden Enden aufgelagert. Sie wird über eine Antriebsscheibe U angetrieben, und treibt über die beiden Abtriebscheiben V und W zwei Förderketten an. Die Förderketten fördern Gegenstände irgendwo durch, wo an den Gegenständen unterschiedliche Widerstände auftreten. In den Förderkräften entstehen daher zeitlich veränderliche Ketten-Zugkräfte.

In der geschweißten Antriebswelle treten daher zunächst veränderliche Torsionsschubspannungen auf (im nächsten Bild als grüne durchgezogene Linie dargestellt). Die Torsionsschubspannungen

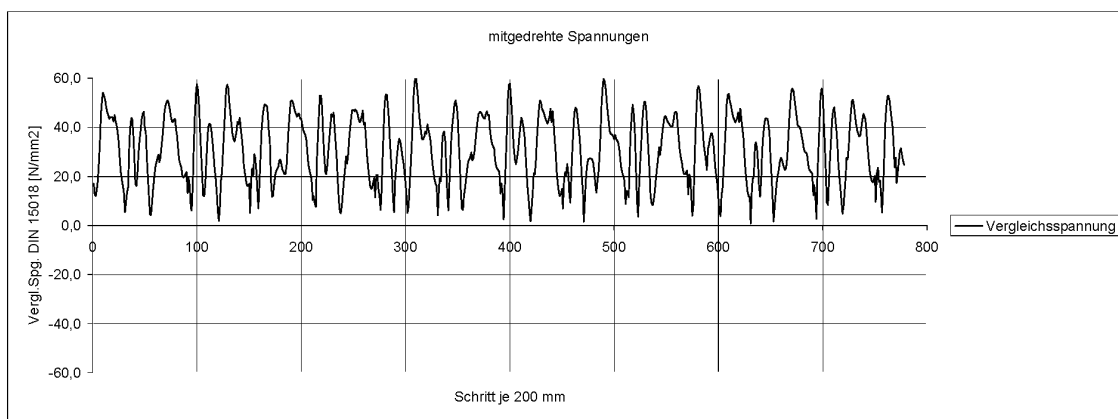
haben um den ganzen Rohrumfang den gleichen Betrag. Aus den Kettenkräften in den An- und Abtriebsketten treten im Rohr Biegemomente in unterschiedlichen Ebenen auf, weil die Ketten in unterschiedlichen Richtungen von der Welle weglaufen. Die daraus entstehenden Biegenormalspannungen in der Welle haben den maximalen Betrag $\sigma = M/W$. Für einen festen Punkt auf der Welle (d.h. mitgedrehtes Koordinatensystem), dessen Ermüdungsbeanspruchung zu untersuchen ist, variieren die auftretenden Biegespannungen cosinus-förmig zwischen $+\sigma$ und $-\sigma$, je nachdem, in welcher Position der umlaufenden Welle sich dieser Punkt gerade befindet, wenn die maximale Torsion auftritt (rote gestrichelte Linie). Außerdem tritt aus der Biegebeanspruchung der Welle noch Schub aus Querkraft auf, wobei die Schubspannungen sinusförmig um den Rohrumfang verlaufen, und dort Null sind, wo gerade die maximale Biegebeanspruchung herrscht (schwarze gepunktete Linie).



Antriebswelle: Zeitverlauf der Spannungen
(Auslegungsberechnung der Förderkräfte)

Aus dem Zeitverlauf der Spannungen ist zu erkennen, daß die Torsionsbeanspruchung in der Welle sich zyklisch nach jeweils 60 Förderschritten wiederholt. Durch die Geometrie der Abtriebsräder bedingt, tritt für einen mitgedrehten Punkt auf der Welle aber erst nach 13 dieser Zyklen wieder die identische Lastsituation auf. Es sind daher $13 * 60 = 780$ Schritte zu betrachten, dieser „Großzyklus“ wiederholt sich dann bis zum Ende der Lebensdauer.

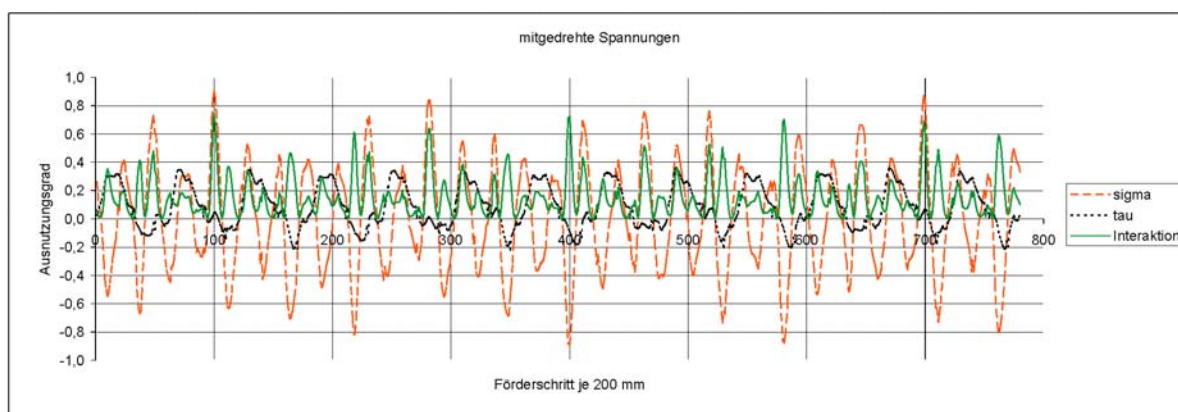
Man erkennt sofort, daß in dem obigen Beispiel die Normal- und Schubspannungen in der Welle nicht nur mehrachsrig sondern auch noch phasenverschoben verlaufen. Das, was wir üblicherweise bei mehrachsigen Spannungszuständen tun, nämlich Vergleichsspannungen oder Vergleichswerte bilden, scheint damit an Sinn zu verlieren:



Antriebswelle: Zeitverlauf der Vergleichsspannungen nach DIN 15018

- Wenn wir zu dem obigen Bild die Vergleichsspannungen bilden, klappen wir alle negativen Spannungsausschläge nach oben (durch Quadrieren und Wurzelziehen). Damit verlieren wir z.B. die Information, daß das Grenzspannungsverhältnis nahe bei $R = -1$ liegt, bzw. daß die maximalen Spannungsausschläge bei mindestens 100 N/mm^2 liegen.
- Außerdem dreht sich mit der Phasenverschiebung der Spannungskomponenten σ und τ auch die Orientierung der Hauptspannungen von Schritt zu Schritt.

Aus diesem Grund ist in DIN 15018 festgelegt, jeweils getrennt für sich die Ausnutzungsgrade der Normalspannungen und der Schubspannungen zu ermitteln und dann in einer quadratischen Interaktionsformel zu überlagern. Damit erhält man die Ausnutzungsgrade im folgenden Diagramm:



Antriebswelle: Ausnutzungsgrade und Interaktion nach DIN 15018

4.1.4 Kollektive

Derartig komplexe Beanspruchungen versucht man dadurch zu charakterisieren, daß man ein „Lastkollektiv“ bildet. Hierzu gibt es viele Verfahren, die (natürlich) alle zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die sogenannte „Reservoir-Methode“ ist im folgenden Bild dargestellt.

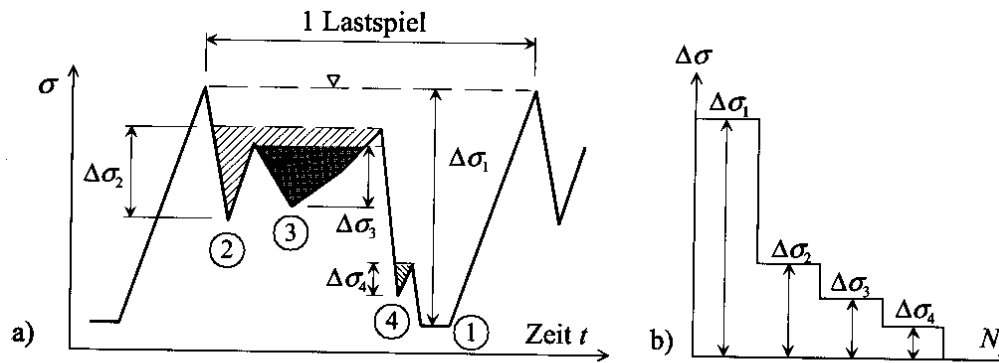


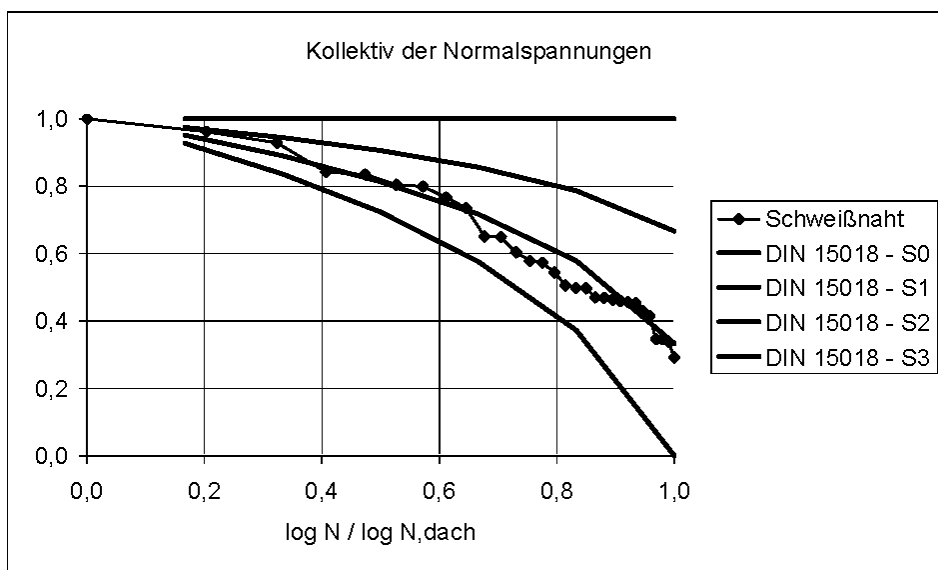
Abb. 8-13 Reservoir-Methode: Spannungs-Zeit-Verlauf und Spannungskollektiv

aus Seeßelberg 2005 [57]

Alle Verfahren zum Bilden von Kollektiven haben gemeinsam, daß man den komplexen Spannungs-Zeit-Verlauf auf irgend eine Weise (künstlich und willkürlich) in einzelne Spannungsausläge zerlegt. Diese sortiert man dann der Größe nach von links nach rechts. Gegebenenfalls bildet man Klassen, z.B. 0-20 N/mm² ; 20-40N/mm² ; 40-60 N/mm² und zählt, wie viele Spannungsausläge z.B. in der Klasse 40-60 aufgetreten sind. Das Ergebnis ist ein Stufenkollektiv.

Man hat nun die Vorstellung, daß man ein derartig analysiertes Bauteil im Bauteilversuch dadurch simulieren kann, wenn man zunächst alle Spannungsausläge in der größten Stufe aufbringt, dann die der zweiten usw.

Das Kollektiv der Normalspannungen für die oben dargestellten 780 Förderschnitte ist im folgenden Diagramm dargestellt. Man erkennt, daß das Kollektiv ziemlich gut mit S1 nach DIN 15018 übereinstimmt. Der zunächst wirr erscheinende Beanspruchungsverlauf ist damit einer rationalen Bewertung zugänglich gemacht.



Normiertes Kollektiv der Normalspannungen zur obigen Antriebswelle

4.1.5 Lineare Schadensakkumulation

Das Bilden von Kollektiven, d.h. das Entwirren der möglicherweise regellos auftretenden Spannungsänderungen, das Sortieren derselben nach Größe setzt stillschweigend voraus, daß ein linearer Zusammenhang besteht zwischen einer Spannungsänderung im Bauteil und einer (Vor- oder Teil-) Schädigung im Hinblick auf ein späteres Ermüdungsversagen („der Werkstoff merkt sich, wieviel Zyklen er schon erlebt hat“). Wenn die Summe der Schädigungen den Wert 1 (oder 100 %) erreicht, versagt das Bauteil. Diese Annahme ist bekannt als „lineare Schadensakkumulations-Hypothese“ oder „Palmgren-Miner-Hypothese“.

Schon früh war bekannt, daß die Lineare Schadensakkumulation so nicht stimmt. Versuche zeigen, daß es nicht egal ist, in welcher Reihenfolge, Gruppierung und Durchmischung kleine und große Spannungsausschläge auftreten. Einige höhere Spannungsausschläge zum richtigen Zeitpunkt können eine materiell bereits eingetretene Ermüdung teilweise wieder heilen bzw. verzögern.

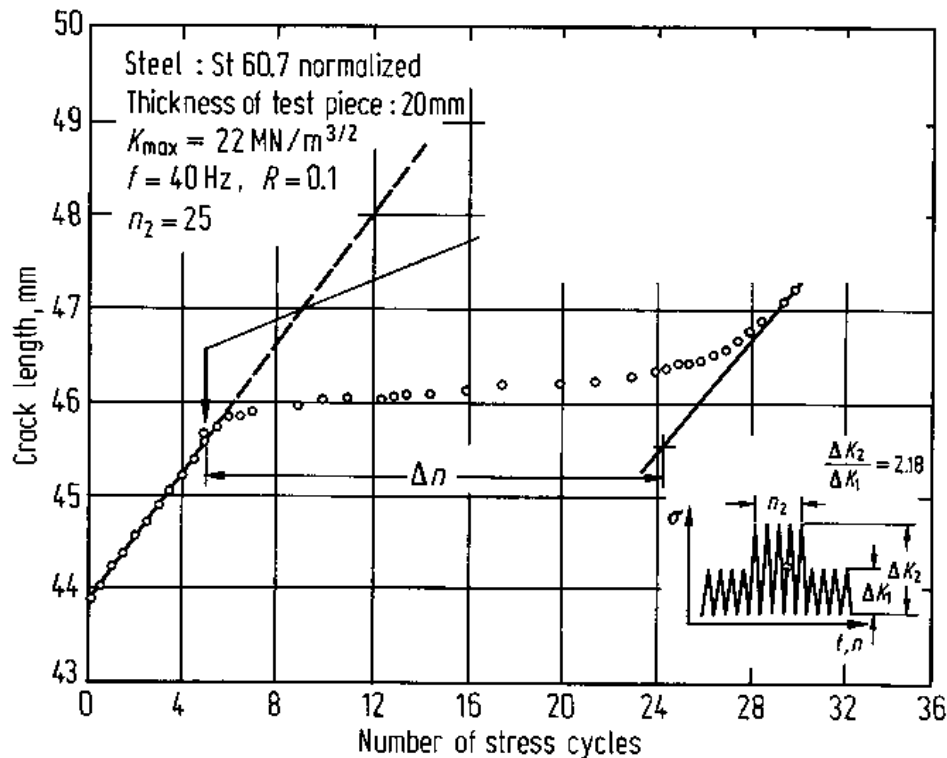


Bild B1.153 aus [31]

Anm. zu fehlerhafter Beschriftung siehe folgender Abschnitt

Hinweise zum vorigen Diagramm:

Wenn man in der Abszisse bei „Number of stress cycles“ als Einheit $[10^3]$ ergänzt, dann erhält man eine Rißfortschrittsgeschwindigkeit von ca. $3 \cdot 10^{-4}$ mm je Lastschritt.

Wenn man weiterhin die Angabe „ K_{max} “ als

$$\Delta K_1 = 22 \text{ MN/m}^{3/2} = 700 \text{ N/mm}^{3/2}$$

interpretiert, dann passen die beiden Werte mit den gängigen Angaben für Rißfortschrittsgeschwindigkeiten zusammen.

Man erkennt aus dem Diagramm, daß der Rißfortschritt durch die höheren Spannungsausläge deutlich verlangsamt wird. Erst nach einer relativ großen Zyklenzahl (ca. 20000) wird die ursprüngliche Rißfortschrittsgeschwindigkeit wieder erreicht. Man erklärt dies damit, daß die wenigen höheren Spannungsspiele in der Rißspitze Fließerscheinungen hervorrufen, welche die im Gefüge bereits vorhandene „Ermüdung“ wieder nahezu aufheben. Der Werkstoff benötigt erst wieder 20000 Lastwechsel, um an der Rißspitze wieder aufs neue zu ermüden.

Eine rechnerische Berücksichtigung dieses Effektes ist bisher nicht möglich. Im Flugzeugbau oder Fahrzeugbau werden Bauteile aber nicht in den sonst üblichen Stufen-Kollektiven geprüft, sondern über numerisch gesteuerte Prüfmaschinen mit quasi-regellosen Beanspruchungsfolgen, die wiederum im Fahrversuch bzw. während typischer Flugphasen aufgezeichnet wurden (mir ist aus den späten 70er Jahren noch das Kollektiv FALSTAFF (Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue) in Erinnerung, siehe z.B. im Internet „random / spectrum loading software for fatigue systems“).

4.1.6 Belastungsfrequenz

Der technische Laie nimmt geht üblicherweise davon aus, daß die Frequenz der Belastungswechsel eine Rolle spielen müsse. Dies ist tatsächlich nicht so. Nur die Anzahl der Belastungswechsel spielt eine Rolle. Deswegen treten am geschweißten Untergestell eines unwichtig laufenden Generators die Schäden eben schon nach einigen Tagen oder Wochen auf und an einer geschweißten Straßenbrücke erst nach 5 bis 10 Jahren.

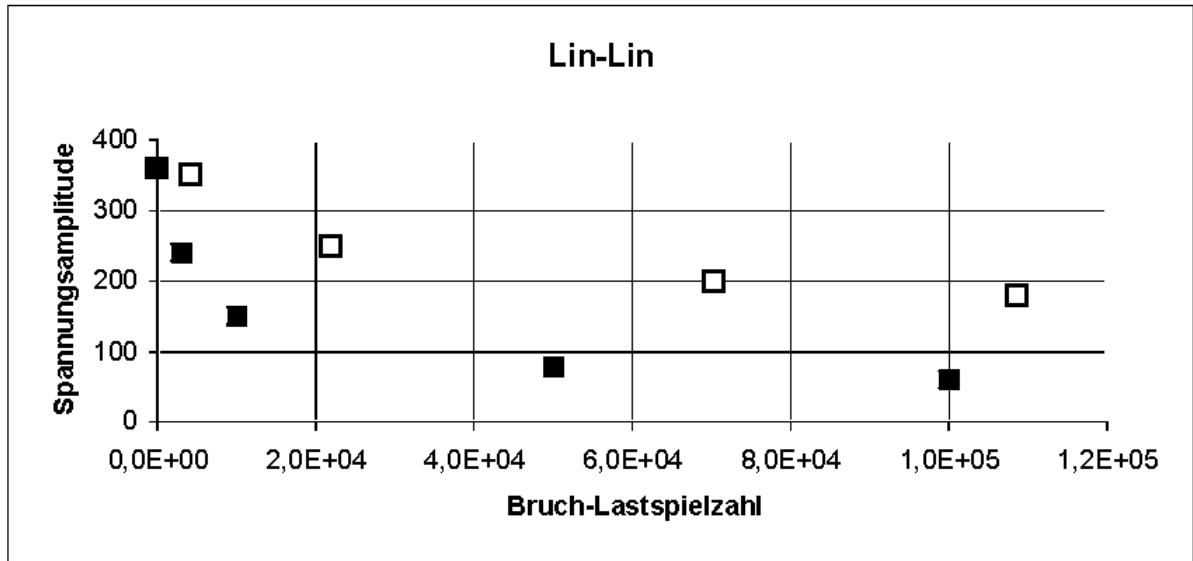
Es gibt allerdings eine Grenze, die zum Beispiel bei Ermüdungsversuchen („Dauerschwingversuchen“) mit Hochfrequenz-Pulsen zu beachten sind: die Probe darf nicht warm werden. Das tritt dann auf, wenn in der Probe in mikroskopischem Maßstab Plastizierungen stattfinden. Eine Prüffrequenz von 100 bis 150 Hz ist jedoch im allgemeinen kein Problem.

4.2 Werkstoff

Es ist naheliegend, anzunehmen, daß die Ermüdungsfestigkeit eine Werkstoffeigenschaft ist, die sich zum Beispiel dann zeigt, wenn man z.B. einen polierten, quasi fehlerfreien Rundstab im Umlaufbiegeversuch prüft. Alle anderen Einflußgrößen, die diese Grund-Ermüdungsfestigkeit abmindern, müsste man dann z.B. geometrischen Kerben zuordnen (siehe Abschnitt weiter unten).

Bei den uns zur Verfügung stehenden technischen Metallen müssen wir jedoch feststellen, daß auch Unregelmäßigkeiten im Gefügestand, wie z.B. Versetzungen, von vorne herein beteiligt sind. Bei der Betrachtung geschweißter Bauteile relativiert sich die Betrachtung einer reinen Werkstoffeigenschaft, weil geschweißte Bauteile von vorne herein als eher stark gekerbt betrachtet werden können.

Klassisch wird die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen als „Wöhlerlinie“ dargestellt. Man erkennt, daß mit steigender Lastwechselzahl zunächst ein deutlicher Festigkeitsabfall auftritt, der sich dann aber schwächer fortsetzt (siehe folgendes Diagramm).

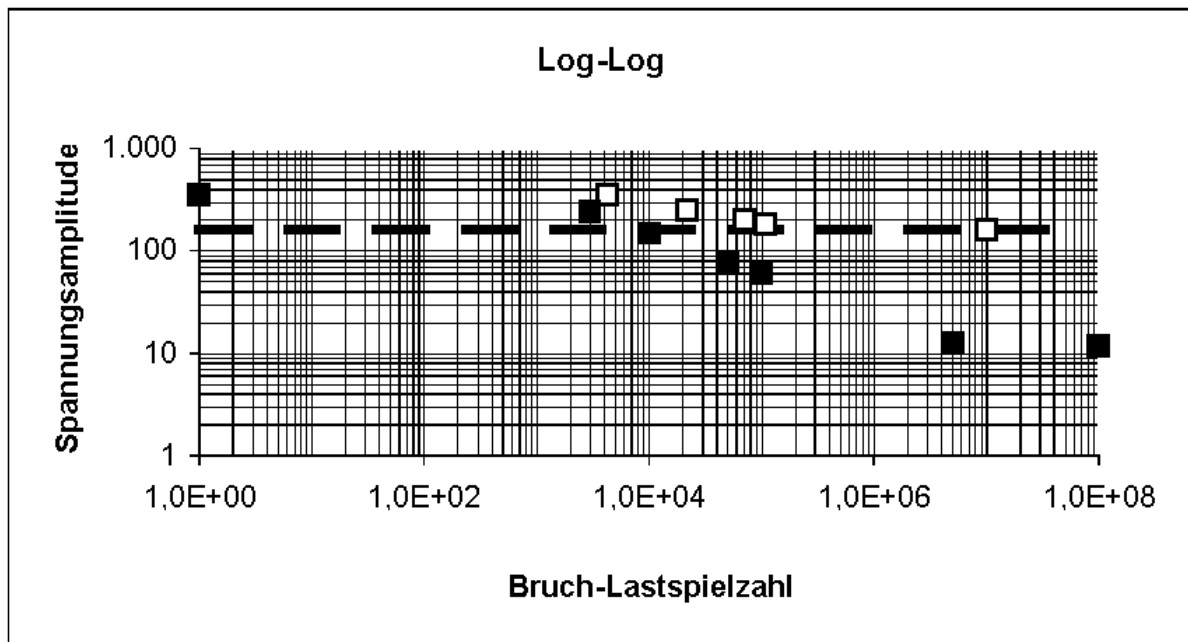


Wöhler-Daten für ungekerbte und gekerbte Probe, lineare Darstellung (siehe Anhang A)

Deutlicher wird dieser Sachverhalte, wenn doppelt-logarithmisch aufgetragen wird. Dann zeigt sich auch die „Wöhlerlinie“.

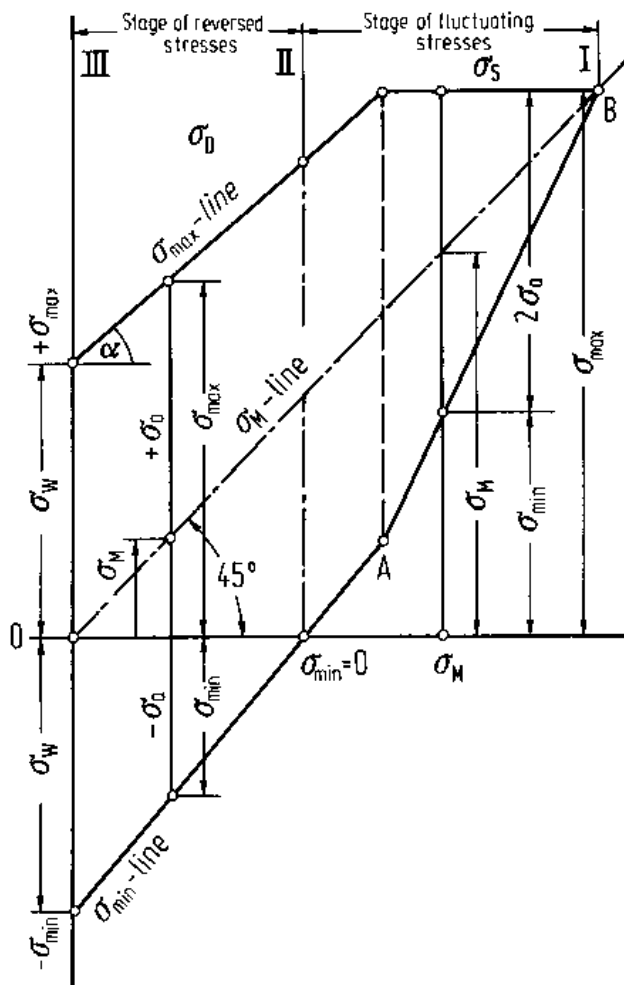
Hinweis:

Die Wöhlerlinie gilt jeweils nur für ein bestimmtes Grenzspannungsverhältnis R .



Wöhler-Daten für ungekerbte und gekerbte Probe (siehe Anhang A)

Für die Darstellung des Mittelspannungseinflusses eignet sich das Smith-Diagramm (siehe folgende Darstellung).



(Smith-Diagramm, Bild B1.136 aus [31])

Eine andere häufige Darstellung ist das Haigh-Diagramm, das z.B. in der FKM-Richtlinie verwendet wird (siehe folgende Darstellung).

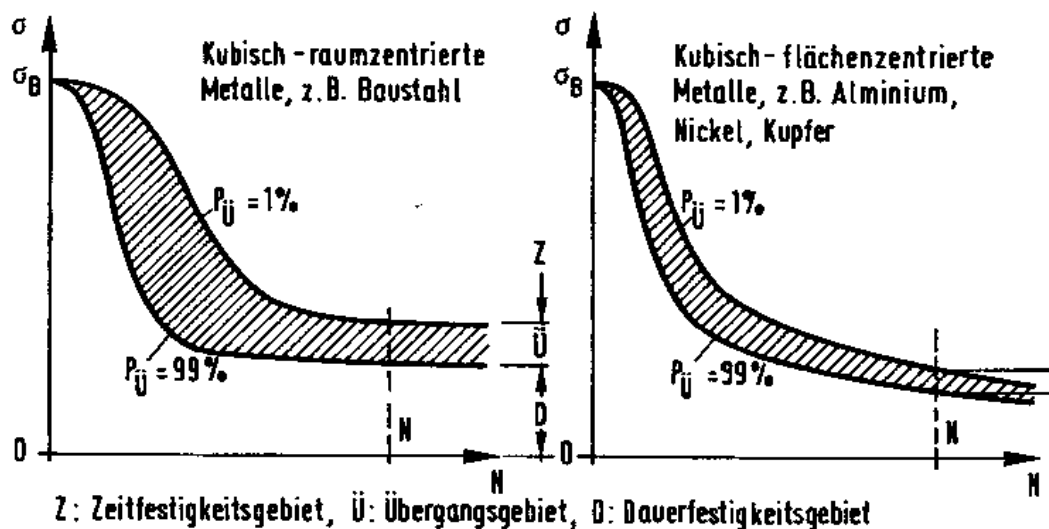


Bild 94

(Bild 94 aus Petersen Stahlbau [29], Abs. 2.6.2.5.6

leider ist zu diesem Diagramm keine eindeutige Quelle angegeben)

4.3 Geometrie

Daß die globale Gestalt eines Bauteiles eine wichtige Einflußgröße ist, liegt auf der Hand. Eine einspringende Ecke führt bei einem spröden Werkstoff schon unter statischer Beanspruchung zu vorzeitigem Versagen, d.h. die einspringende Ecke reduziert das Tragverhalten.

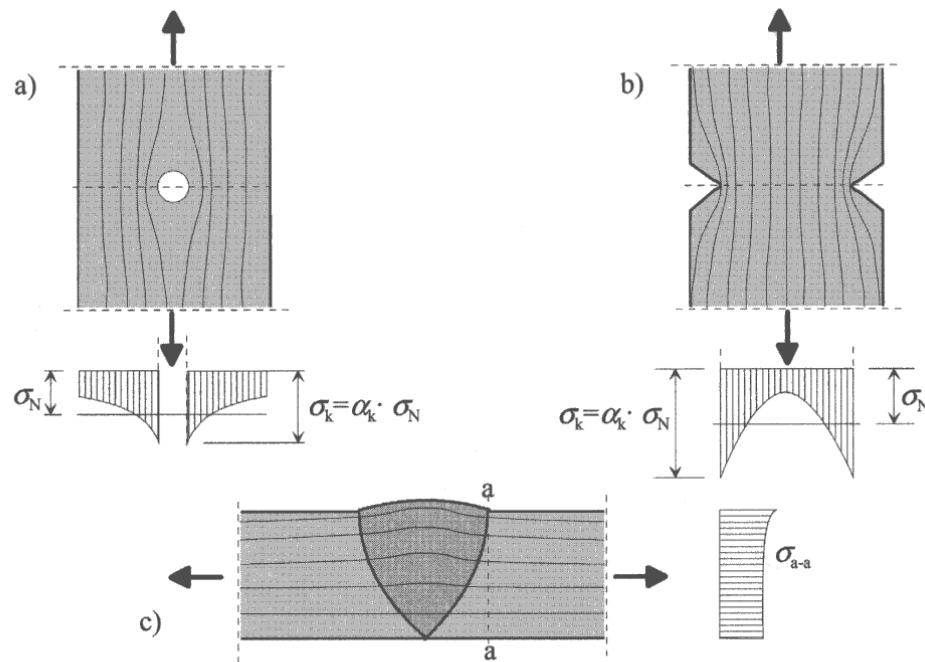


Abb. 8-10 Elastische Spannungsverteilungen bei Zugstäben a) mit Lochkerbe; b) mit Spitzkerbe und c) bei einer Kerbe infolge einer Stumpfnah

Spannungsverlauf an Kerben

(aus Seeßelberg 2005 [57])

In gleicher Weise wurden „Kerben“, d.h. lokale Einschnitte in den Kraftfluß, als wichtigste Einflußgröße identifiziert, nach dem die Charakteristik der zeitlichen Veränderung der Last bei der Bemessung eines Bauteiles eine Zielgröße darstellt, nämlich die einer möglichst hohen ertragbaren Last.

Branchentypisch gab es in der Folge unterschiedlichen Umgang mit Kerben:

- Eine eher mikroskopisch orientierte Betrachtung eines effektiven Kerbradius, den man bei genauem Hinsehen auch im Kerbgrund einer eingefrästen V-Nut finden kann.

In diesem Zusammenhang beschreibt der Begriff „Neubersche Kerbspannungslehre“ (erstmal erschienen 1937) heute ein theoretisches Gebäude, daß uns heute unerlässlich für das Verständnis des Tragverhaltens metallischer Strukturen steht.

- Eine eher makroskopisch orientierte Betrachtung von „Kerbfällen“, wie z.B. ein Querschnittsteil mit aufgeschweißter Längsrippe. Diese erfuhren wiederum eine feinere Einteilung in verschiedene Ausführungsgüten, d.h. die Begrenzung innerer Fehler in den

Schweißnähten und die Sicherstellung einer kraftflußgünstigen Oberfläche durch Beschleifen. Die Kerbfälle sind im übrigen stark branchenorientiert, sie finden in jedem der unten angeführten Regelwerke andere Kerbfälle, mit z.T. deutlich abweichenden Angaben zur Tragfähigkeit bei ähnlichen oder gleichen Kerbfällen.

Als Beispiel sind im folgenden Bild einige Grund-Kerbfälle aufgeführt, die von links nach rechts zunehmende Kerbschärfe aufweisen.

Regelwerke	Lochstab	Stumpfstoß Sondergüte	Kreuzstoß mit K-Nähten	Stumpfstoß Normalgüte	Quersteife	Längssteife I (kurz)	Längssteife II (lang)	Kreuzstoß mit Kehlnähten
1		B	E	D	C	C, E	C	F
2	W II	K II	K VII	K V	K VIII	K IX - K X		K X
3	W 1	K 0	K 3	K 1	K 3	K 2 - K 4		K 4
4								

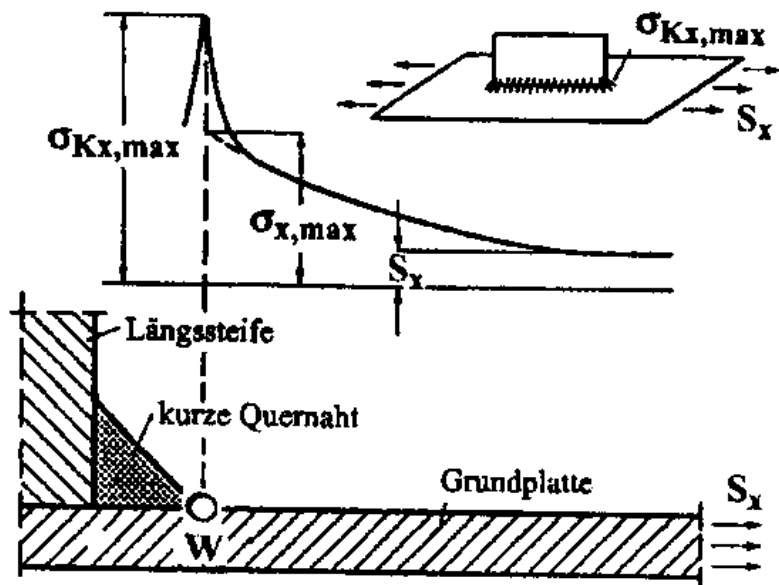
Bild 85 Legende: 1: DV 804 (alt) bzw. DV 848 (alt), 2: DS 804 (neu), 3: DIN 15018, 4: DIN 4132

(Bild 94 aus Petersen Stahlbau [29], Abs. 3.7.3)

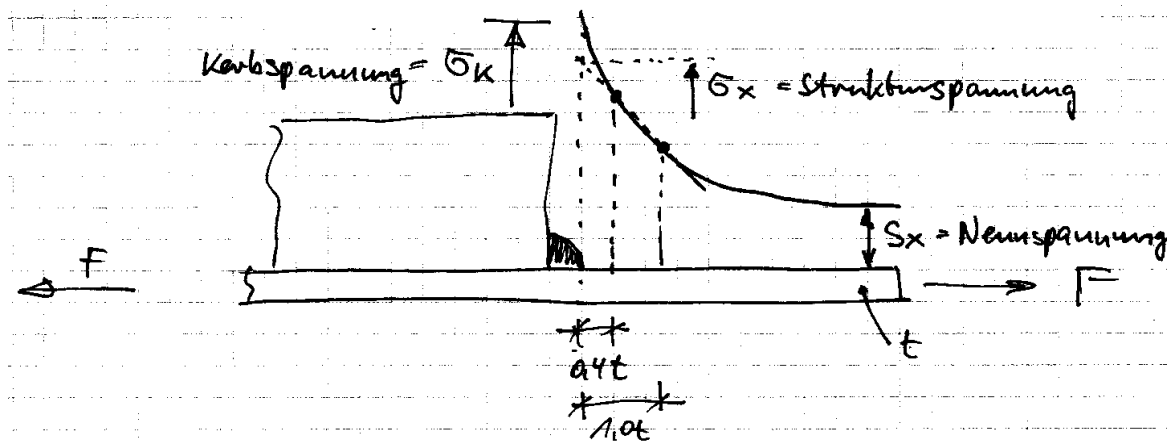
Bereits seit längerer Zeit im Zusammenhang mit Dehnungsmeßstreifen aber auch im Zusammenhang mit FEM-Rechnungen benutzt man heute üblicherweise das Konzept der „Strukturspannungen“ anstelle der „örtlichen Spannungen“ oder „Kerbspannungen“. Die Strukturspannung ist eine gegenüber der tatsächlichen Kerbspannung rechnerisch künstlich reduzierte Spannung, die als technologische Vergleichs- und Bewertungsgröße dient. Dies hat praktische Gründe:

- Klebt man einen Dehnungsmeßstreifen (DMS) so nah wie technisch möglich an den Fuß einer Kehlnaht, so ist der Mittelpunkt des Meßgitters immer noch mindestens 3 bis 5 mm vom Nahtfuß entfernt. Man kann also die Kerbspannung nicht messen, sondern muß ohnehin extrapolieren – mit allen möglichen Fehlern, die das mit sich bringt.
- Mit der Finite-Elemente-Methode als Werkzeug der elastischen Festigkeitslehre erhält man an einer einspringenden, nicht ausgerundeten Ecke (wie z.B. einem Nahtfuß) per definitionem unendlich hohe Spannungen. Wenn man nicht die Spannungen, sondern Dehnungen betrachtet, sind auch diese unendlich hoch. Falls man materiell nichtlinear rechnet, d.h. Pla-

stizieren an der Kerbe rechnerisch berücksichtigt, dann erhält man zwar endliche Dehnungen, hat sich aber von der Definition der Kerbspannung entfernt.

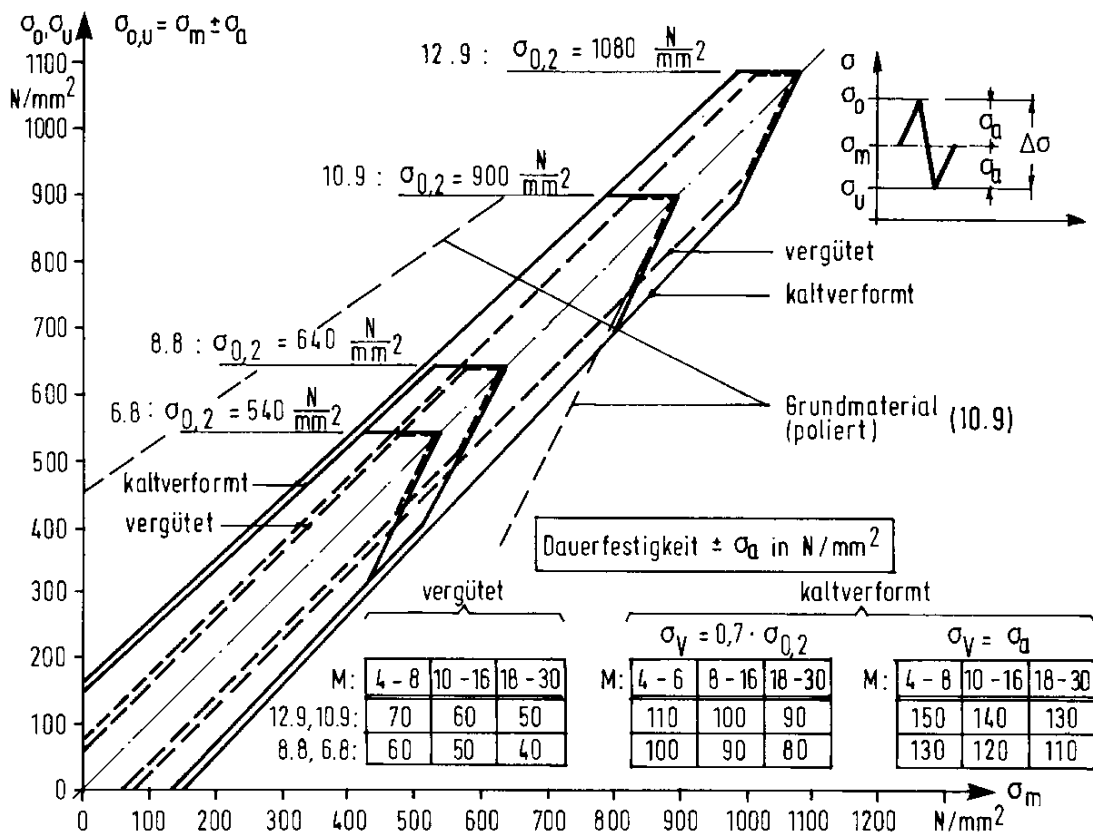


Strukturspannungen σ_x , Kerbspannungen σ_{Kx}
 (aus FKM-Richtlinie [16])



P. Knödel, Vorlesungsmitschrift bei Prof. Fahrenwaldt, SLV Fellbach, 09.12.05.

Zum Teil stellt man aber auch fest, daß beim Vergleich unterschiedlicher Quellen (Normen, Fachliteratur) die gleiche Kerbe mit sehr unterschiedlichen Dauerfestigkeitswerten belegt wird.



Smith-Diagramm für Schrauben (Bild 71 aus Petersen Stahlbau [29], Abs. 9.8)

Man erkennt, daß die kleinste Amplitude der Dauerfestigkeit für alle Schraubengüten und –durchmesser bei $\sigma_a = 40 \text{ N/mm}^2$ liegt. Das entspricht einer Spannungsdoppelamplitude bzw. einem Spannungsausschlag von $\Delta\sigma = 80 \text{ N/mm}^2$. Nach EC3, und darauf harmonisiert auch DIN 4133, ist zwischenzeitlich ein Spannungsausschlag von $\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$ zugelassen !!!

4.4 Oberflächenzustand

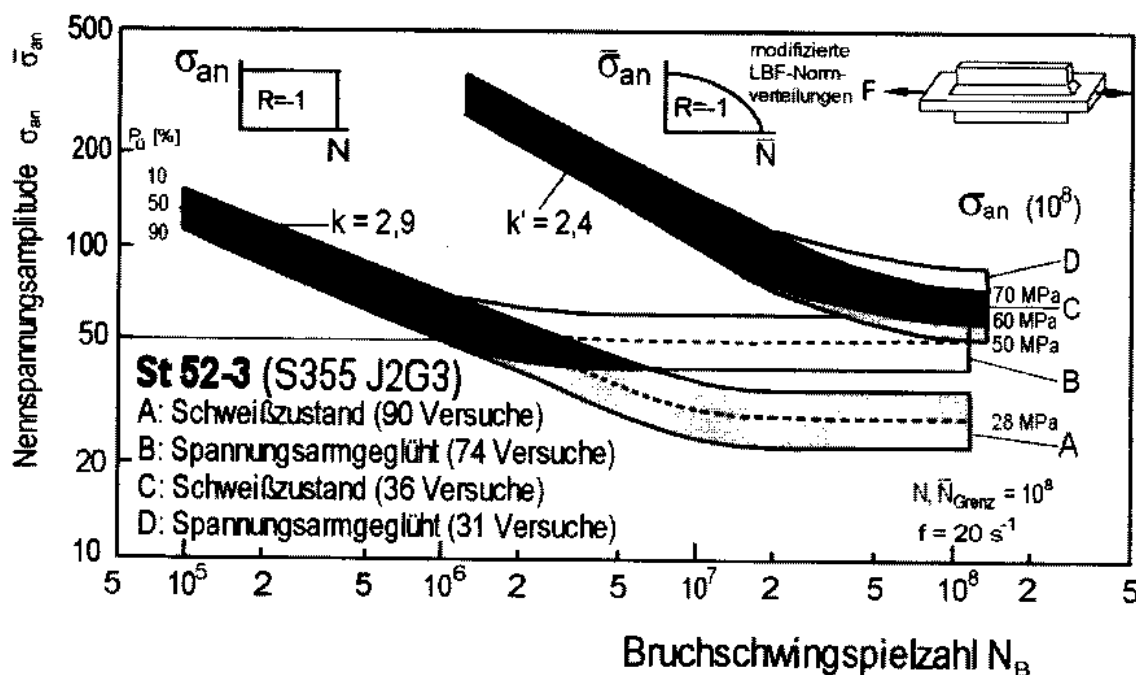
Besonders im Maschinenbau wird dem Oberflächenzustand eine große Aufmerksamkeit geschenkt. Man erkannte schon früh (eher intuitiv), daß eine polierte Oberfläche die Dauerfestigkeit z.B. von Wellen, oder Turbinenschaufeln) stark erhöht, bzw. eine entsprechende Lebensdauer erst sicherstellt.

Aus meiner Sicht kann das mit der Brille der Kerbspannungslehre gesehen werden, dann wird klar, daß Oberflächenkerben als Rißauslöser wirken. Interessant wären z.B. Daten über den Zusammen-

hang zwischen Oberflächen-Rauhtiefe und Dauerfestigkeit, solche Daten sind mir jedoch nicht bekannt.

Ähnliches gilt für alle Arten der Oberflächenbehandlung, wie z.B. Nitrieren, Härten, Kugelstrahlen usw. Die ursprüngliche Veranlassung für diese Oberflächenbehandlung liegt vielleicht daran, eine höhere Standzeit für die Lagerflächen zu erreichen. Nach heutigem Verständnis werden bei allen diesen Verfahren zum Teil beträchtliche Druck-Eigenstressungen in der Oberfläche erzeugt, was wiederum die Erstrißbildung verzögert.

4.5 Eigenspannungen



(Bild 10 aus [40])

Nach gängiger Lehrmeinung sind in jeder Schweißnaht Eigenspannungen in Höhe der Streckgrenze des Grundmaterials zu erwarten. Dies gilt bei genauem Hinsehen vielleicht nicht in dieser Ausschließlichkeit für Eigenspannungen quer zu einer einlagig geschweißten Stumpfnah, in Längsrichtung einer Naht trifft dies jedoch sicher zu.

Damit läßt sich die immer wieder aufkommende Streitfrage klären, ob ein Bauteil unter Druck-Schwellbeanspruchung deutlich weniger ermüdet, d.h. ob es eine starke Vorzeichenabhängigkeit oder letztendlich Mittelspannungsabhängigkeit gibt, oder ob das Vorzeichen der zeitlich veränderlichen Beanspruchung völlig egal ist, es somit nur auf den Spannungsausschlag ankommt (das nennt man Mittelspannungsunabhängigkeit).

Man erklärt den Effekt mit folgender Modellvorstellung:

- Eine Schweißnaht hat Zugeigenspannungen in Höhe der Streckgrenze. Diesen Spannungen wird eine Zug-Schwellbeanspruchung überlagert. Während der ersten Lastwechsel tritt eine Überlastung der Schweißnaht auf, durch Fließen reduziert sich der Eigenspannungszustand so weit, daß am Schluß eine Zug-Schwellbeanspruchung mit der Streckgrenze als Höchstwert vorliegt.
- Eine Schweißnaht hat Zugeigenspannungen in Höhe der Streckgrenze. Diesen Spannungen wird eine Druck-Schwellbeanspruchung überlagert. Nach Addition der Spannungen entsteht in der Schweißnaht eine Zug-Schwellbeanspruchung mit der Streckgrenze als Höchstwert.

Aufgrund dieser Erklärung ist also verständlich, warum das Ermüdungsverhalten von geschweißten Bauteilen tatsächlich nur von den Spannungsausschlägen abhängt. Dies läßt sich natürlich durch Spannungsarmglühen des Bauteils (siehe obiges Diagramm) positiv beeinflussen.

Eine schon lang bekannte Methode, die in letzter Zeit offenbar wieder verstärkt an Bedeutung gewinnt, ist das teilmechanisierte Hämmern der Naht. Ermüdungsversuche zeigen vielversprechende Ergebnisse.

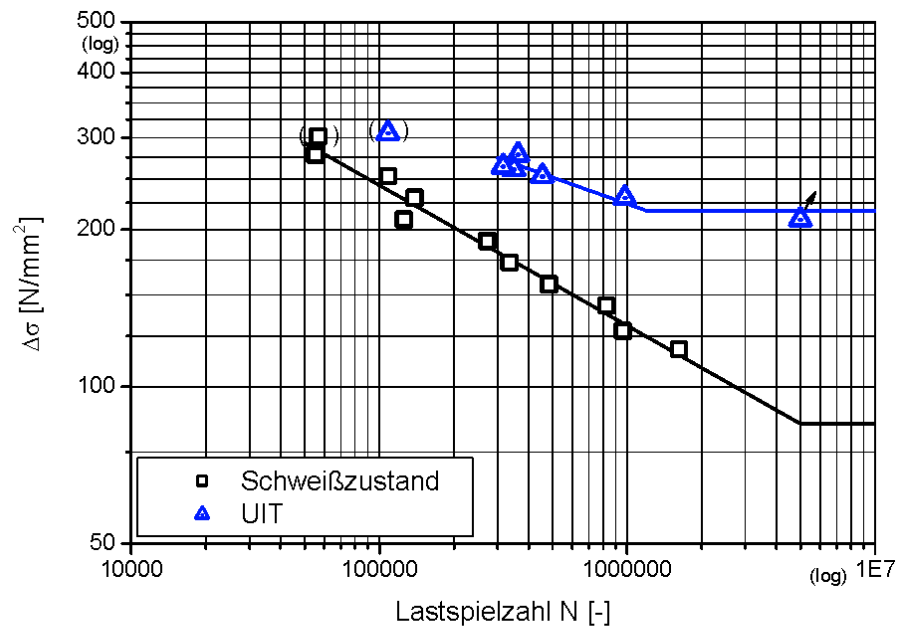


Bild 7. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S355, R=0,1)

(aus Gerster/Poel 2005 [35])

4.6 Zusammenfassung

Üblicherweise wird die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteiles mit Hilfe einer kerbfallbezogenen Wöhlerlinie beschrieben.

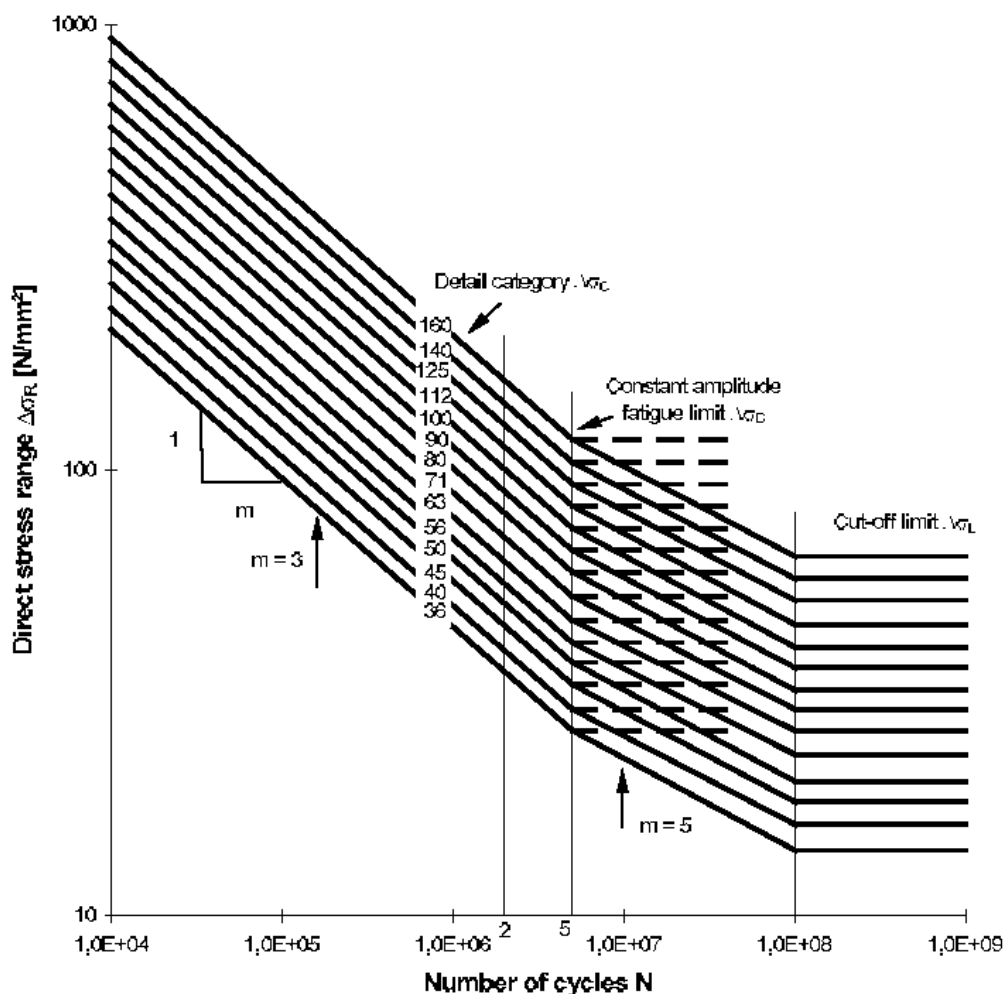


Figure 7.1: Fatigue strength curves for direct stress ranges

Bemessungskurven für Stahl nach Eurocode 3 [1])

Man unterscheidet die Kurzzeitfestigkeit mit höchstens 10^4 Lastwechseln, die ausreichend genau auch als „vorwiegend ruhende Beanspruchung“ behandelt werden kann, die Dauerfestigkeit für mehr als $5 \cdot 10^6$ oder 10^8 Lastwechsel und die Zeitfestigkeit dazwischen.

Der Knick als Übergang zur Dauerfestigkeit wird inzwischen nicht mehr bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln angenommen, alle Referenzwerte für Kerfall- oder FAT-Klassen beziehen sich jedoch nach wie vor auf $2 \cdot 10^6$.

Bei geschweißten Bauteilen arbeitet man mit einer „normierten Wöhlerlinie“ im log-log-Diagramm, die im Zeitfestigkeitsbereich eine Steigung $m = 3$ bei Stahl hat. Dadurch verlaufen die Kurven für unterschiedlich scharf gekerbte Bauteile parallel. Es werden nur noch Spannungsausschläge SR

(sigma-range) bewertet, d.h. es wird jeweils der ungünstigste Eigenspannungszustand und Mittelspannungsunabhängigkeit angenommen. Die niedrigste Kerbfallklasse bei Stahl ist 36 N/mm^2 .

Hinweis:

Für Schubspannungen gibt es jeweils eigene Wöhlerlinien.

Die Vorgehensweise bei Aluminium ist methodisch gleich, nur daß dort eine Vielzahl unterschiedlicher Steigungen der Wöhlerlinien berücksichtigt wird.

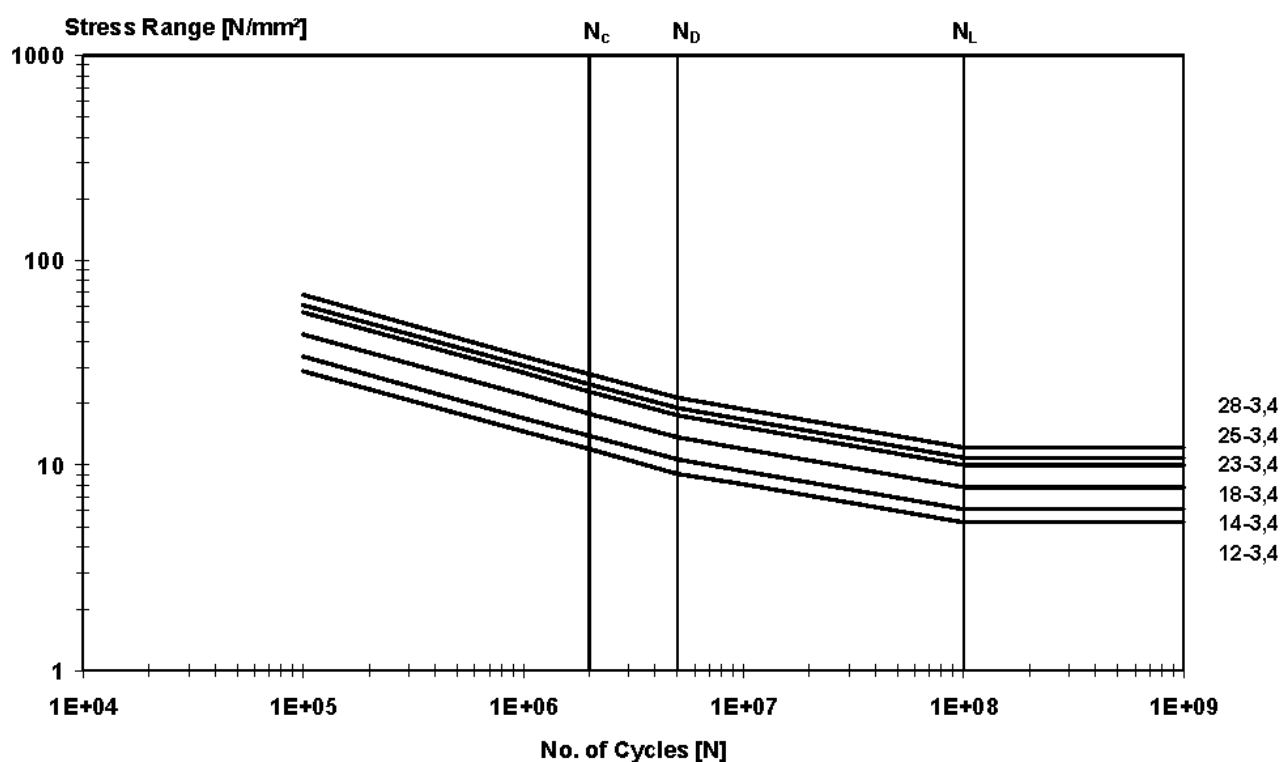


Figure 6.6 Design curves $\Delta\sigma-N$ for fillet-welded joints between members – detail categories as in Table 6.9

Bemessungskurven für Aluminium nach Eurocode 9 [3])

5. Rechenverfahren

5.1 Nennspannungskonzept

Das klassische Verfahren ist das Betrachten von Nennspannungen in einem Bauteil. Die Kerbwirkung wird dadurch erfaßt, daß das vorhandene Detail mit den Bildern in einem Kerbfallkatalog verglichen wird und möglichst zutreffend zugeordnet.

Aus dem zugrunde gelegten Regelwerk ergibt sich dann ein Referenzwert für zwei Millionen Lastwechsel.

Diesen rechnet man dann um auf die Lastwechselzahl, für die man eine „zulässige Spannung“ benötigt. Man benutzt dazu die Steigung $m = 3$ der Wöhlerlinie für geschweißte Bauteile (oder anders, wie z.B. bei Aluminium).

Die Formel zum Umrechnen zweier Wertepaare auf der log-log-Linie mit der Steigung m lautet:

$$\Delta\sigma_{,B} / \Delta\sigma_{,A} = (N_{,A} / N_{,B})^{1/m}$$

oder

$$(\Delta\sigma_{,B} / \Delta\sigma_{,A})^m = (N_{,A} / N_{,B})$$

Aus Sicht des Maschinenbaus (nicht geregelter Bereich) bietet sich an, sich das Regelwerk herauszusuchen, nach dem man die günstigsten Ergebnisse bekommt. Die im Falle eines Schadens zu – stellende Frage nach der Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik müsste man wahrscheinlich so beantworten, daß diese im Moment durch EC3 und EC9 beschrieben sind.

5.2 Kerbspannungskonzept

Bei komplexen Bauteilen kann oft eine Nennspannung im klassischen Sinne nicht definiert werden, deswegen bietet sich in diesen Fällen eine FEM-Berechnung und ein Vorgehen nach der FKM-Richtlinie [16] an. Da auf der Einwirkungsseite die Erhöhung der Spannungen rechnerisch explizit berücksichtigt wird, erfolgt die Bewertung gegen entsprechend hohe Werkstoffwiderstände.

Ein Anwendungsbeispiel in der FKM-Richtlinie beschreibt einen Lochstab mit quer durch das Loch verlaufender Stumpfnah. Als Werkstoffwiderstand wird eine Mittelspannung von ca. 800 N/mm^2 mit einer ertragbaren Spannungsamplitude von ca. 420 N/mm^2 ermittelt. Der Werkstoff ist übrigens

ein S235. Ich habe daher (vorerst) noch etwas Schwierigkeiten, mich für dieses Verfahren zu erwärmen.

5.3 Bruchmechanik

Die Bruchmechanik gilt inzwischen als eigenes Wissens- und Lehrgebiet (siehe z.B. Knödel 2004 [39]). Mir persönlich fällt es schwer, die Methoden der Bruchmechanik als „normales“ Bemessungsverfahren zu betrachten, da man dafür erst Fehler bestimmter Größe im Bauteil voraussetzen muß. Auf bruchmechanische Methoden gehe ich daher im Rahmen des vorliegenden Vortrages nicht näher ein.

Selbstverständlich halte ich Grundkenntnisse der Bruchmechanik bei der Betrachtung von Ermüdungsproblemen für wichtig, da sie uns eine detailliertere Vorstellung davon vermittelt, welche Mechanismen sich beim Rißfortschritt bis zum (spröden) Bruch tatsächlich abspielen.

6. Regelwerke

In der folgenden Tabelle sind die bei uns gängigen Regelwerke für Ermüdungsnachweise zusammengestellt. Vollständigere Angaben, z.B. zu Überlebenswahrscheinlichkeit und statistischer Absicherung durch Versuchswerte, sind in Jaenicke 1998 [36] enthalten.

Branche	Bezeichnung	Erstveröffentlichung	Werkstoff	Bemerkungen
Maschinenbau	DIN 15018 Krane	1974	unlegierte Stähle	$k = 3,3$ $N_D = 2 \cdot 10^6$ mittelspannungsabhängig
Stahlbau	DIN 4132 Kranbahnen	1980	unlegierte Stähle	wie DIN 15018 ?
Stahlbau	DIN 4131 Antennentragwerke aus Stahl	1991	unlegierte Stähle	$k = 3,0$ $N_D = 5 \cdot 10^6$ mittelspannungsunabhängig
Stahlbau	DIN 4133 Schornsteine aus Stahl	1991	unlegierte Stähle	$k = 3,0$ $N_D = 5 \cdot 10^6$ mittelspannungsunabhängig
Stahlbau	DS 804, DS952		unlegierte Stähle	$k = 3,75$ $N_D = 2 \cdot 10^6$ mittelspannungsabhängig
Fahrzeugbau	DIN 6700			
Stahlbau	DASSt-Ri 011		Feinkornbaustähle bis S690	wie DIN 15018 ?
Stahlbau	EC3	1993	unlegierte Stähle	$k = 3,0$ $N_D = 5 \cdot 10^6$ mittelspannungsunabhängig
Aluminiumbau	EC9		Aluminium	$k = 3,4$ bis $7,0$ $N_D = 1 \cdot 10^8$ mittelspannungsunabhängig
Druckbehälter	AD-S1, AD-S2	vor 1986 ?	unlegierte, hochlegierte Stähle	undurchsichtig
Maschinenbau	FKM-Richtlinie	1993	unlegierte und hochlegierte Stähle, Stahlguß, Aluminium; (zum Teil mit Warnvermerk)	wahlweise Nenn- oder örtliche Spannungen für Stahl: $k = 3,0$ $N_D = 5 \cdot 10^6$ Mittelspannungsabhängigkeit kann individuell berücksichtigt werden

hier nicht enthalten:

Regeln aus der Luft- und Raumfahrttechnik (die es sicher gibt)

7. Offene Fragen

- Haben kubisch flächenzentrierte Werkstoffe, d.h. austenitische Chrom-Nickel-Stähle oder Aluminium, eine Dauerfestigkeit? Oder geht die Wöhlerlinie, wenn auch mit deutlich verringerter Neigung, unendlich weit bergab?
(die einen sagen so, die anderen so)

- Stimmt die Hypothese, daß Ermüdung dann auftritt, wenn irgendwo zumindest mikroskopisch Plastizieren auftritt (als irreversibler, dissipativer Vorgang)? Das klingt eigentlich sehr schlüssig, passt auch mit der Bruchmechanik zusammen.
Warum wird dann in einem Beispiel der FKM-Richtlinie für ein Bauteil aus S235 mit einer lokalen Kerbspannung von ca. 800 N/mm^2 (!) Mittelspannung und ca. 320 N/mm^2 (!) Spannungsamplitude ausreichende Dauerfestigkeit ausgewiesen?

- Warum muß ich bei einer FEM-Berechnung eine „Radaj-Kerbe“ mit einem Kerbradius von $1,0 \text{ mm}$ (!!!) ansetzen, um zutreffende Ergebnisse zu bekommen?
Ich folgere daraus, daß entweder tatsächlich im Kerbgrund plastische Verformungen auftreten können, ohne daß das ermüdungsrelevant wird, oder daß im Kerbgrund nichtlineare, aber reversible Verformungen auftreten müssen. Das wiederum würde aber einer Hysterese ohne Flächeninhalt im statischen Versuch entsprechen – so was gibt’s doch gar nicht ...

8. Literatur

8.1 Normen, Regelwerke, Richtlinien

- [1] DIN V ENV 1993 (EC3): Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. prEN 1993-1-9:2002-02: Fatigue strength of steel structures – final draft.
- [2] DIN V ENV 1999 (EC9): Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten. Teil 2: Ermüdungsanfällige Tragwerke. 2001-03.
- [3] prEN 1999 (EC9): Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1-3: Structures susceptible to fatigue. (Draft August 2004)
- [4] DIN 4131: Antennentragwerke aus Stahl. November 1991. Steel radio towers and masts. (In LTB 2004 Baden-Württemberg aufgeführt)
- [5] DIN 4132: Kranbahnen. Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung. Februar 1980. (Ersatz für DIN 120)
- [6] DIN 4132: Kranbahnen. Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung. Februar 1981. Beiblatt 1: Erläuterungen. Februar 1981. (In LTB 2004 Baden-Württemberg aufgeführt)
- [7] DIN 4133: Schornsteine aus Stahl; Statische Berechnung und Ausführung. August 1973.
- [8] DIN 4133: Schornsteine aus Stahl. November 1991. (In LTB 2004 Baden-Württemberg aufgeführt)
- [9] DIN 15018 Krane. Grundsätze für Stahltragwerke. (Ersatz für DIN 120)
Blatt 1: Berechnung. April 1974.
Blatt 2: Grundsätze für die bauliche Durchbildung und Ausführung. April 1974.
- [10] DIN 15018 Krane. Grundsätze für Stahltragwerke.
Teil 1: Berechnung. November 1984.
Teil 2: Grundsätze für die bauliche Durchbildung und Ausführung. November 1984.
Teil 3: Berechnung von Fahrzeugkränen. November 1984.
- [11] Richtlinie 804: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten. DB Netz, 01.05.03 - V01.
- [12] DS 804 (B6): Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI) mit Bekanntgaben B1 bis B6, gültig ab 25.09.2000. September 2000.
- [13] DS 952: Schweißen metallischer Werkstoffe an Schienenfahrzeugen und maschinentechnischen Anlagen. Deutsche Bahn AG.
- [14] DIN Fachbericht 103: Stahlbrücken. Ausgabe März 2003.
- [15] ECCS: European Recommendations for Aluminium Alloy Structures Fatigue Design. ECCS-TC2, No 68, 1992.
- [16] Hänel, B., Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: FKM - Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguß- und Aluminiumwerkstoffen. 5. Auflage, VDMA Verlag, Forschungskuratorium Maschinenbau, Frankfurt, 2003.

- [17] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (Hrsg):
AD-Merkblatt S1: Abgrenzung zwischen der Berechnung gegen vorwiegend ruhende In-
nendruckbeanspruchung und der Berechnung gegen Schwellbeanspruchung. Mai 1988.
Zitierte Ausgabe davor: Juni 1986.
- [18] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (Hrsg):
AD-Merkblatt S1: Vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung. Mai 1998.
- [19] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (Hrsg):
AD-Merkblatt S2: Berechnung auf Schwingbeanspruchung. Mai 1988.
Zitierte Ausgabe davor: Juni 1986.
- [20] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (Hrsg):
AD-Merkblatt S2: Berechnung auf Wechselbeanspruchung. Mai 1998.
- [21] DAST Richtlinie 011: Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreck-
grenzenwerten von 460 und 690 N/mm² – Anwendung für Stahlbauten (02/88).
- [22] N.N.: DVS Merkblatt 2401: Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbin-
dungen.
Teil 1: Grundlagen und Vorgehensweise. Oktober 1982.
Teil 2: Praktische Anwendung. April 1989.
Teil 3: Beispielsammlung. August 1996.
enthalten in: Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 101. 2. Auflage, DVS-Verlag Düsseldorf
1996.

8.2 Standardwerke und Klassiker

- [23] Beitz, W., Grothe, K.-H. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 20. Neubear-
beitete und erweiterte Auflage. Springer, Berlin 2001.
- [24] Deutscher Stahlbau Verband (Hrsg.): Stahlbau Handbuch, Für Studium und Praxis, 2. Auf-
lage, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln. Band 1 (1982), Band 2 (1985).
- [25] Deutscher Stahlbau Verband (Hrsg.): Stahlbau Handbuch - Für Studium und Praxis. 3. Auf-
lage, Band 1 Teil A, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1993.
- [26] Neuber, Heinz: Kerbspannungslehre. Theorie der Spannungskonzentration. Genaue Berech-
nung der Festigkeit. 4. Aufl. Springer, Berlin 2001. (erstmalig erschienen 1937)
- [27] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics, Vol. 12 (1945),
No. 3, pp 159-164. (zitiert nach [41]).
- [28] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Inge-
nieure, Band 58 (1924), Nr. 14, S. 339-341. (zitiert nach [41]).
- [29] Petersen, Chr.: Stahlbau. Vieweg, Braunschweig 1988.
- [30] Petersen, Chr.: Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg, Wiesbaden, 1996.
- [31] Verein deutscher Eisenhüttenleute (ed.): Steel. A Handbook for Materials Research and En-
gineering.
Volume 1: Fundamentals. Springer, Berlin 1992.
Volume 2: Applications. Springer, Berlin 1993.

- [32] 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. (zitiert nach [41]).

8.3 Fachliteratur

- [33] von Berg, Dietrich: Krane und Kranbahnen. Berechnung, Konstruktion, Ausführung, 2. Auflage. Teubner, Stuttgart 1989.
- [34] Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. (Hrsg.): Schädigungsmechanismen und Bruch. 28. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, 26.-27.02.96 in Bremen, DVM-Bericht 228, Berlin 1996. ISSN 0943-3473
- [35] Gerster, P., van der Poel, H.: „Ultrasonic Impact Technology“ – Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Lebensdauer von Schweißkonstruktionen? Große Schweißtechnische Tagung Essen 2005, DVS-Berichte Band 237, Düsseldorf 2005.
- [36] Jaenicke, B.: Festigkeitsnachweis für ermüdungsbeanspruchte Schweißverbindungen nach deutschen und europäischen Regelwerken. Seite 135 ff in [58].
- [37] Knödel, P.: Schweißnähte am Ausleger einer "Betonpumpe". Skriptum zur Vorlesung „Fallbeispiele“ im Rahmen der Schweißfachingenieurausbildung an der SLV-Fellbach. Seit Dezember 2003 laufend aktualisiert.
- [38] Knödel, P.: Störabspannungen für Stahlschornsteine. Stahlbau 73 (2004), Heft 4, S. 254-261.
- [39] Knödel, P.: Bruchmechanik. Skriptum zur Vorlesung im Rahmen der Schweißfachingenieurausbildung an der SLV-Mannheim. Seit April 2004 laufend aktualisiert.
- [40] Krebs, J., Hübner, P., Kaßner, M.: Eigenspannungseinfluss auf Schwingfestigkeit und Bewertung in geschweißten Bauteilen. DVS-Berichte Band 234. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2004.
- [41] Kuhlmann, U.: K 4.2 Modellierung und Auslegung von Tragwerken unter ruhender und wechselnder Beanspruchung. Skript Teil IV, Ermüdung und Betriebsfestigkeit, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, WS 2004 / 2005. (siehe Palmgren / Miner) (www.uni-stuttgart.de/ke/Lehre/Vorlesungen/K42/Teil4.pdf am 17.01.06)
- [42] Lacher, G., Hedenkamp, A.: Betriebsfestigkeit von hochfesten vorgespannten Schrauben in Stirnplattenstößen von Kranbahnen. Stahlbau 63 (1994), Heft 11, S. 343-346.
- [43] Mang, F., Knödel, P.: Schweißen und Schweißverbindungen. Abschnitt 9.3 in: Stahlbau Handbuch - Für Studium und Praxis. 2. Auflage, Band 1, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1982. S. 427-444.
- [44] Mang, F., Bucak, Ö., Knödel, P.: Neuere Erkenntnisse zum Entwurf und zur Berechnung von Stahlschornsteinen. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. (Hrsg.): Stahlschornsteinbau – fortschrittliche Lösungen. Tagungsband, Fachtagung Aachen 03.04.92, Dresden 08.05.92.
- [45] Mang, F., Knödel, P.: Schweißen und Schweißverbindungen. Abschnitt 10.3 in: Stahlbau Handbuch - Für Studium und Praxis. 3. Auflage, Band 1 Teil A, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1993. S. 577-612.

- [46] Mang, F., Knödel, P.: Neuere Erkenntnisse zum Entwurf und zur Qualitätssicherung bei Stahlschornsteinen. Tagungsbericht 20, Freudenstadt 1993, Landesvereinigung der Prüfingenieure für Baustatik Baden-Württemberg e.V., S. 65-97.
- [47] Nitschke-Pagel, Th., Wohlfahrt, H.: Residual stress distributions after welding as a consequence of the combined effect of physical, metallurgical and mechanical sources. pp 123-134 in Karlsson, L., Lindgren, L.E., M.Jonsson, M. (eds): Mechanical Effects of Welding. Proc., IUTAM Symposium 10.-14.06.1991, Lulea (Sweden). Springer Verlag, Berlin 1992.
- [48] Nitschke-Pagel, Th.: Eigenspannungen und Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Feinkornstähle. Diss. TU Braunschweig 1994.
- [49] Nitschke-Pagel, Th., Wohlfahrt, H.: Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences. pp 215-225 in Dias, A.M., Pina, J., Batista, A.C., Diogo, E. (eds): Proc., 6th Europ. Conf. on Residual Stresses. Trans Tech Publications, Switzerland 2002.
- [50] Nitschke-Pagel, Th., Wohlfahrt, H.: Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences. pp 70-78 in Lu, Jian (ed): Handbook on Residual Stress, 2nd Edition, Vol. 1. Society for Experimental Mechanics, Inc., American Institute of Physics, 2005.
- [51] Peil, U.: Baudynamik. Kapitel 7 in: Stahlbau Handbuch - Für Studium und Praxis. 3. Auflage, Band 1 Teil A, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1993. S. 379-451.
- [52] Petersen, Chr.: Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau. Herausgeber: Maurer Söhne GmbH & Co. KG, München 2001, anlässlich des 125jährigen Firmenjubiläums. ISBN 3-00-008059-7
- [53] Puthli, R., Herion, S.: Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle. Projekt P512 - Forschungsvereinigung für Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, Schlußbericht erscheint voraussichtlich Anfang 2006.
- [54] Radaj, D.: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen. Ermüdungsfestigkeit. DVS-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [55] Radaj, D., Sonsino, C.M.: Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten. DVS-Verlag Düsseldorf 2000.
- [56] Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin 2003.
- [57] Seeßelberg, Christoph: Kranbahnen. Bemessung und konstruktive Gestaltung. Bauwerk Verlag, Berlin 2005.
- [58] Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. Empfehlungen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure. Tagung Fulda 22.-23.09.98. VDI-Berichte 1442. VDI-Verlag Düsseldorf 1998.
UB-KA 98A4252
- [59] Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. Empfehlungen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure. Tagung Fulda 05.-06.06.2002. VDI-Berichte 1689. VDI-Verlag Düsseldorf 2002.

- [60] Wohlfahrt, H., Nitschke-Pagel, Th., Kaßner, M.: Schweißbedingte Eigenspannungen – Entstehung und Erfassung, Auswirkung und Bewertung. DVS-Berichte Band 187, DVS-Verlag, Düsseldorf 1997.

Ermüdungsfestigkeit S235

(Formular pk_05-09-04.xls)

Wechselfestigkeit (Wikipedia-Wöhlerversuch)
 Mittelspannung Null

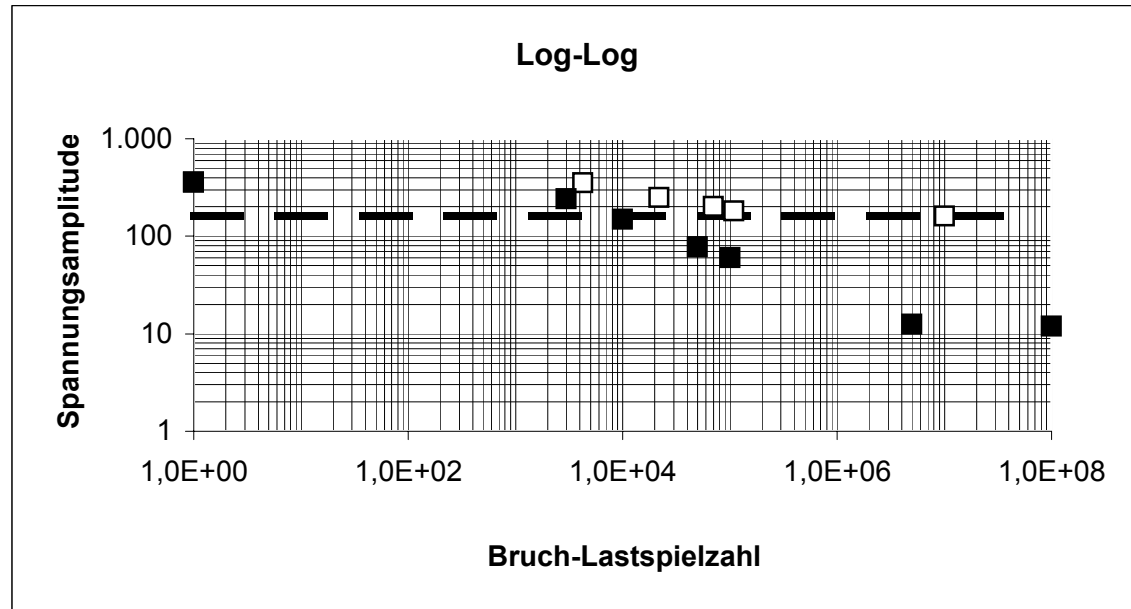
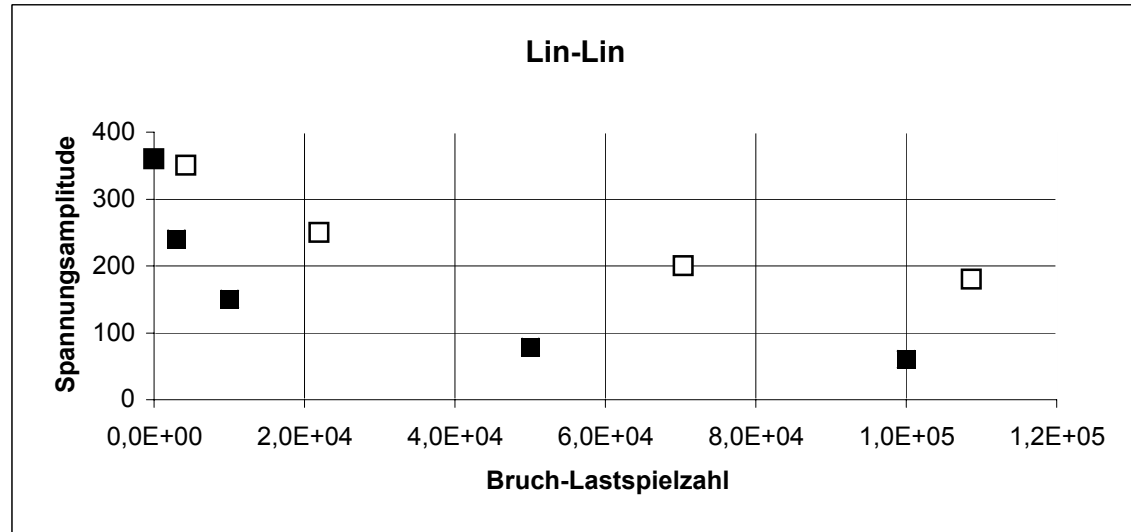
Spannungsamplitude	Bruch-Lastspielzahl
360	1
350	4.252
250	21.987
200	70.355
180	108.664
160	10.000.000

Wechselfestigkeit
 (Knödel, fiktiv aus EC3: FAT 36, m=2,5)
 Mittelspannung Null

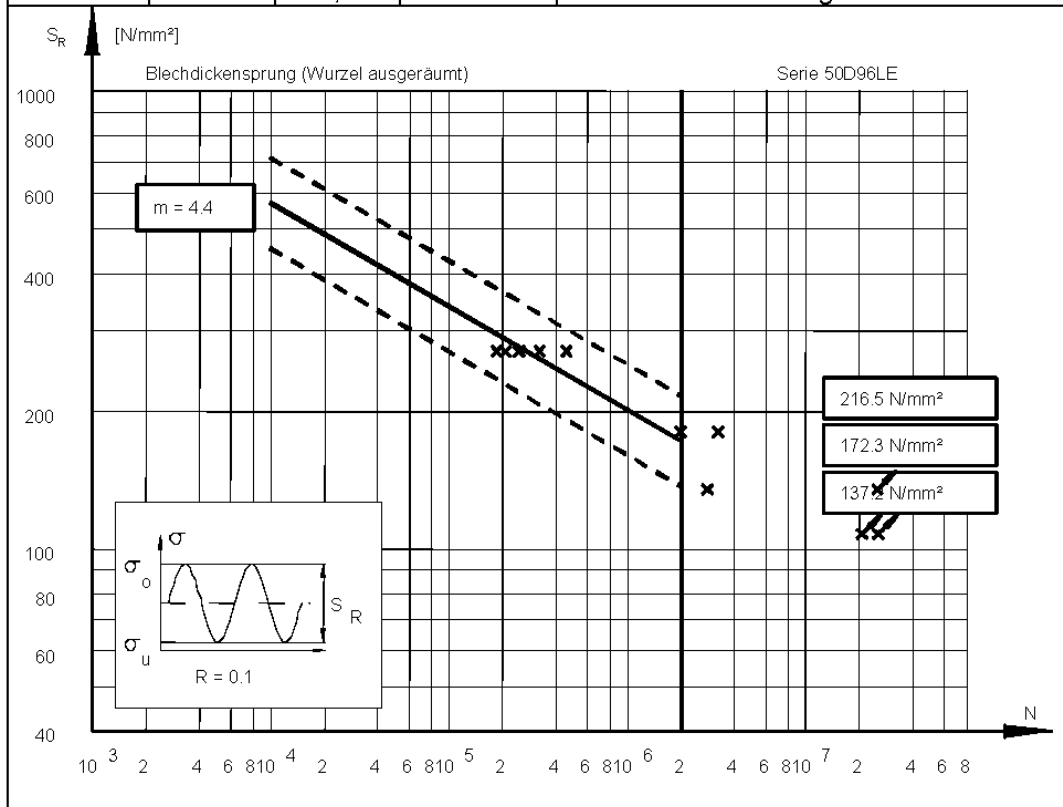
Spannungsamplitude	Bruch-Lastspielzahl
360	1
240	3.000
150	10.000
78	50.000
60	100.000
13	5.000.000
12	100.000.000

Zulässige Spannungen (statisch)

160	1
160	50.000.000



Ergebnisse Ermüdungsversuche				50d 96 LE
Serie	50d 96 LE P9			
Abmessungen [mm]	500x80			
Stahlgüte	S960			
WPS				
Blehdickensprung mit Stumpfnah (mit Gegenlage und ausgeräumter Wurzel)				
Probe Nr.	S_R [N/mm ²]	R	N_f	Bemerkungen
01	270	0,1	207.590	
02	270	0,1	322.341	
03	180	0,1	3.209.607	
04	180	0,1	1.987.741	
05a	135	0,1	>25 Mio.	Versuch abgebrochen, Last erhöht
05b	270	0,1	456.240	Fortsetzung von 05a
06	135	0,1	2.797.064	
07°	108	0,1	> 25 Mio.	Versuch abgebrochen, Last erhöht
07b	270	0,1	245.964	Fortsetzung von 07a
08°	108	0,1	>20 Mio.	Versuch abgebrochen, Last erhöht
08b	270	0,1	183.908	Fortsetzung von 08a



Wöhlerlinie aus aktueller Forschung zu Krandedetails bei S960

Quelle: Dr. Herion, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe, 16.01.06