

WERKSTOFFTECHNIK-GRUNDPRAKTIKUM

Versuch G10: Festigkeit bei zyklischer Beanspruchung

Inhalt

1. Versuchsziel
2. Grundlagen
 - 2.1 Allgemeines
 - 2.2 Wöhlerdiagramm
 - 2.3 Kerbwirkung
3. Versuchsdurchführung
 - 3.1 Wechselbiegemaschine
 - 3.2 Kurze Bedienungsanleitung
4. Aufgabenstellung und Versuchsauswertung
5. Literatur
6. Kontrollfragen
7. Anhang

Name:

Vorname:

Matrikelnr.:



1. Versuchsziel

Spektakuläre Unfälle mit zum Teil tragischen Konsequenzen für die betroffenen Menschen, basieren nicht selten auf der unzureichenden Auslegung von zyklisch (zeitlich veränderlich) beanspruchten Bauteilen. Wenn ein Werkstoff zyklisch belastet wird, zeigt er in der Regel ein anderes Festigkeitsverhalten als bei einer rein statischen Belastung. Eine unzureichende Kenntnis des Konstrukteurs über diese Art des Werkstoffverhaltens, wenn er ein neues Bauteil auslegt, kann schlimmstenfalls zu Unglücken, wie im Bild auf der ersten Seite zu sehen, führen. Durch eine sachgemäße Berechnung der Lebensdauer eines Bauteils unter Berücksichtigung des veränderten Materialverhaltens unter zyklischer Beanspruchung, kann das Versagensrisiko stark minimiert werden. Eine solche Berechnung beinhaltet in der Regel die Festigkeitsabschätzung mit Hilfe einer sogenannten Wöhlerkurve, deren Ermittlung und Anwendung in diesem Versuch behandelt wird. Ebenfalls soll in diesem Versuch gezeigt werden, welchen teilweise fatalen Einfluss Kerben auf die Lebensdauer eines Bauteils haben können.

2. Grundlagen

2.1 Allgemeines

Metallische Werkstoffe ertragen schwingende Belastungen selbst dann nicht beliebig oft, wenn die hierbei auftretenden Spannungsamplituden $\sigma_{a, i}$ gering gegenüber der im Zugversuch ermittelten Zugfestigkeit R_m sind. Die sich zeitlich verändernden und wiederholenden Beanspruchungen führen in vielen Fällen zu einem Ermüdungs- oder Dauerbruch. Hieraus ergibt sich für die Auslegung schwingend belasteter Bauteile die zwingende Forderung, Werkstoffkenngrößen zu verwenden, welche das mechanische Verhalten unter schwingender Beanspruchung widerspiegeln. Solche Kenngrößen können mit Schwingprüfmaschinen oder Wechselbiegemaschinen aus Dauerschwingversuchen ermittelt werden. Oft wird zur Durchführung eines Dauerschwingversuchs eine sinusförmige Belastung mit konstanter Amplitude bis zum Bruch der Probe aufgebracht und die Bruchzyklenzahl N_f registriert.

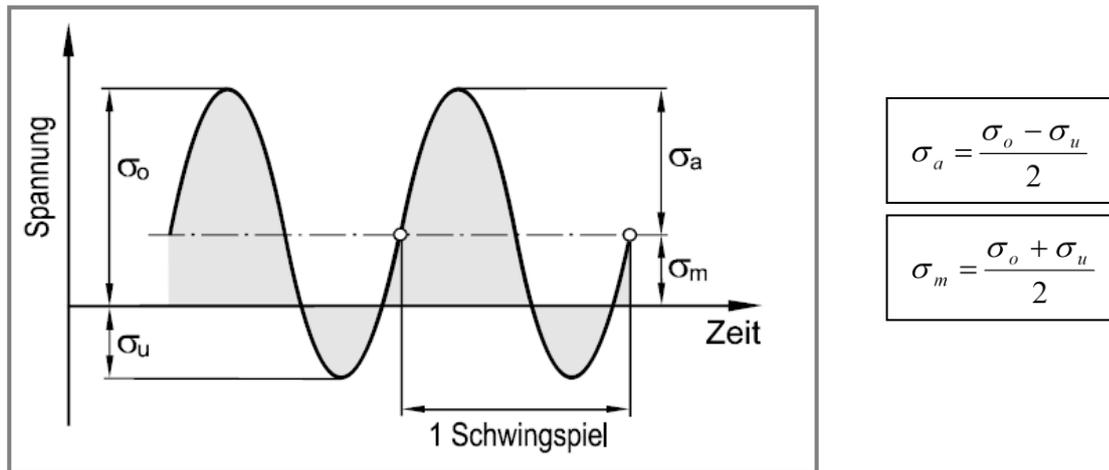


Abb. 2-1: Schematischer Verlauf einer schwingenden Belastung

Abb. 2-1 zeigt den schematischen Verlauf einer spannungskontrollierten Schwingbeanspruchung mit der Mittelspannung σ_m . σ_o entspricht der Oberspannung, σ_u der Unterspannung und σ_a der Spannungsamplitude. Je nach Lage der Mittelspannung unterscheidet man verschiedene Bereiche der Dauerschwingbeanspruchung. Diese in **Abb. 2-2** schematisch dargestellten Bereiche lassen sich in einfacher Form durch das Spannungsverhältnis R angeben, welches in der Literatur häufig verwendet wird. Es ergibt sich aus dem Quotienten von Unter- zu Oberspannung ($R = \sigma_u / \sigma_o$). In den verschiedenen Belastungsbereichen ergeben sich jeweils unterschiedliche Mittelspannungen, welche eine große technische Relevanz besitzen. Den Einfluss der Mittelspannung auf das Dauerfestigkeitsverhalten kann man sogenannten Dauerfestigkeitsschaubildern (z.B. nach Smith oder Haigh) entnehmen

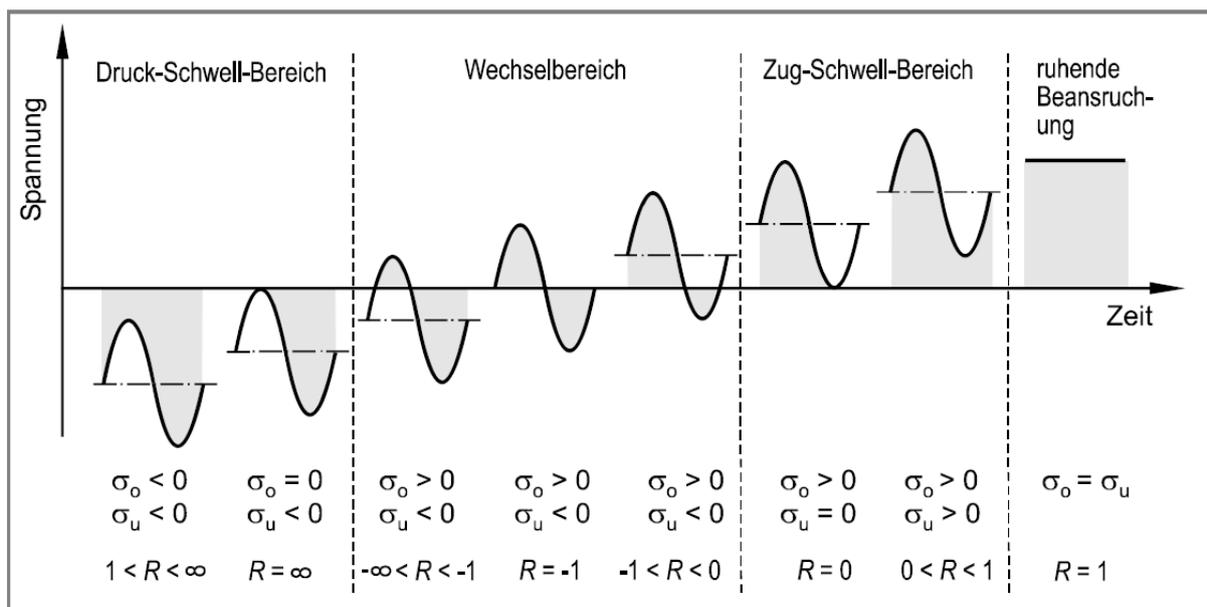


Abb. 2-2: Belastungsbereiche mit zugehörigem Spannungsverhältnis

Nicht nur die Belastungsart, sondern auch die Beschaffenheit des Prüfkörpers (Geometrie) hat Einfluss auf das Dauerschwingverhalten. So können Kerben die Lebensdauer deutlich herabsetzen (s. Abschnitt 2.3). Beispielhaft für Kerben in Bauteilen sind künstlich eingearbeitete Löcher in Turbinenschaufeln um die Kühlung der Bauteile im Betrieb zu gewährleisten. An diesen Kühllöchern (**Abb. 2-3**) sind Spannungsüberhöhungen zu erwarten, die zum Ermüdungsrisswachstum und damit zu frühzeitigem Versagen führen können.

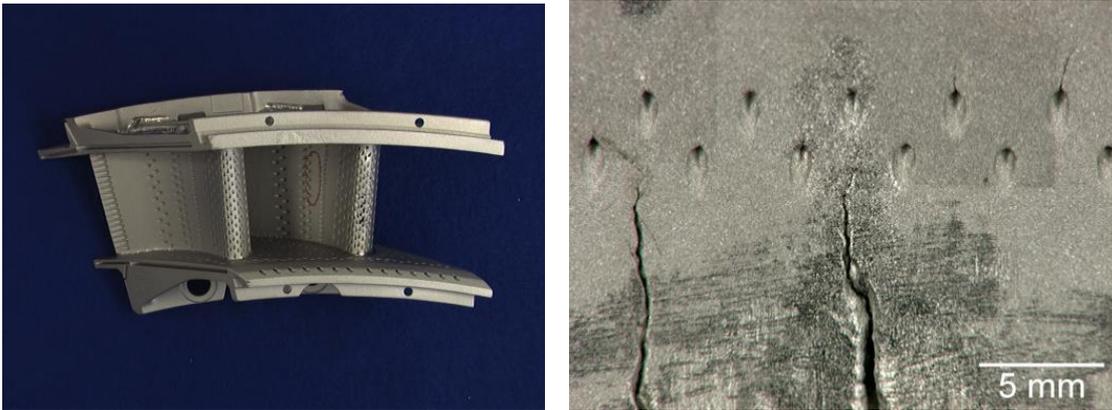


Abb. 2-3: Ermüdungsrisse an einer Turbinenschaufel durch zyklische Beanspruchung

2.2 Wöhlerdiagramm

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, sind zur Auslegung schwingend beanspruchter Bauteile Werkstoffkenngrößen erforderlich, welche das mechanische Verhalten unter zyklischer Belastung widerspiegeln. Es wird also ein Diagramm benötigt, welches den Zusammenhang zwischen einer ertragbaren Beanspruchung (z.B. Spannung als Folge einer äußeren Last) und der zugehörigen Lebensdauer (in Form von Lastspielen) bis zum Bruch oder technischen Anriss darlegt. Diese Kenngrößen sind in sogenannten Wöhlerkurven enthalten. Anhand einer solchen Kennlinie kann der Konstrukteur abschätzen, ob sein Bauteil eine vorgegebene zyklische Last (z.B. das Biegemoment am Achsschenkel eines Pkw) bis zu einer bestimmten Lastspielzahl $\hat{=}$ Lebensdauer ertragen kann, siehe Abb. 2-4

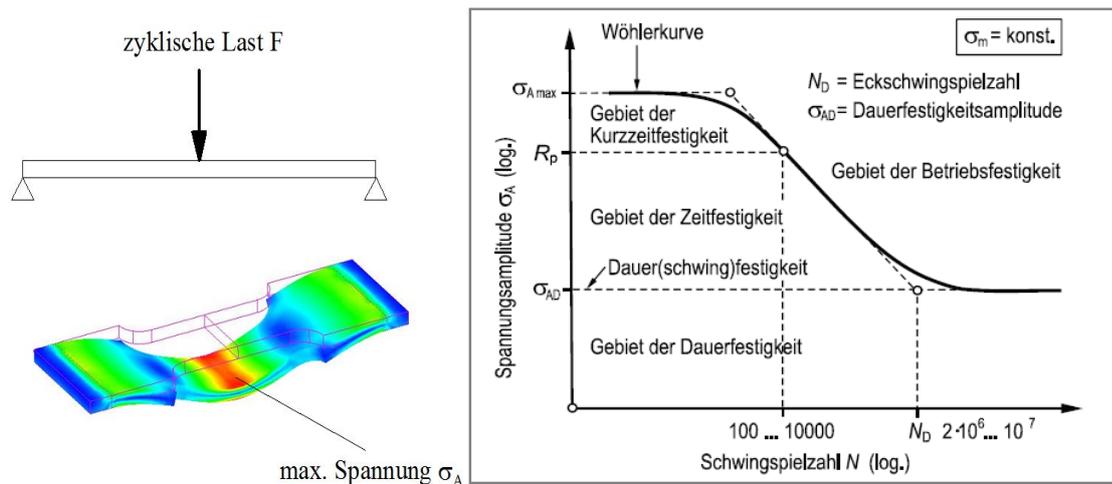


Abb. 2-4: Zusammenhang: Zyklische Belastung - Wöhlerlinie

Durch eine logarithmische Auftragung der Diagrammkoordinaten erreicht man, in einem weiten Bereich der Wöhlerkurve, einen linearen Zusammenhang zwischen Spannungsausschlag und Lastspielzahl. Eine Wöhlerkurve bezieht sich immer auf ein konkretes Spannungsverhältnis R (z.B. $R = -1$), siehe hierzu auch Abschnitt 2.1. Nachdem die Kurve im sogenannten Zeitfestigkeitsbereich durch eine Neigung und einen charakteristischen Schwingfestigkeitswert σ_A/N_A definiert ist, geht sie anschließend in einen horizontalen Verlauf, den Dauerfestigkeitsbereich, über. Je nach Werkstoff wird diese Dauerfestigkeit bei 2×10^6 bis hin zu 10^7 Lastspielen angenommen. Das Festigkeitsverhalten über diesem Lastspielzahlbereich konnte aus versuchstechnischen Gründen in der Vergangenheit nur selten abgedeckt werden (eine Prüfmaschine mit einer Frequenz von 20 Hz braucht ca. eine Woche, um 10^7 Zyklen zu erreichen). Neuere Untersuchungen der letzten Jahre (inzwischen gibt es Prüfmaschinen, die im kHz-Bereich laufen) zeigen aber, dass auch im vermeintlich als dauerhaft deklarierten Bereich nicht für jeden Werkstoff auch tatsächlich von einer uneingeschränkten Dauerfestigkeit ausgegangen werden kann. Vielmehr ist bei einigen Materialien im Anschluss an das Plateau ein erneuter Abfall der Schwingfestigkeit zu beobachten. Im Ingenieuralltag finden diese Erkenntnisse aber bisher nur bedingt Anwendung. Gängige Regelwerke zur Lebensdauervorhersage von Bauteilen bilden immer noch klassisch den Übergang der Wöhlerkurve in das horizontale Plateau ab, wenngleich dieser Bereich zum Teil nur unzureichend experimentell abgedeckt ist. In diesem klassischen Sinne unterscheidet man bei einer Wöhlerlinie zwischen 3 charakteristischen Bereichen (**Abb. 2-5**):

- dem Kurzzeitfestigkeitsbereich,
- dem Zeitfestigkeitsbereich und
- dem Wechsel- oder Dauerfestigkeitsbereich.

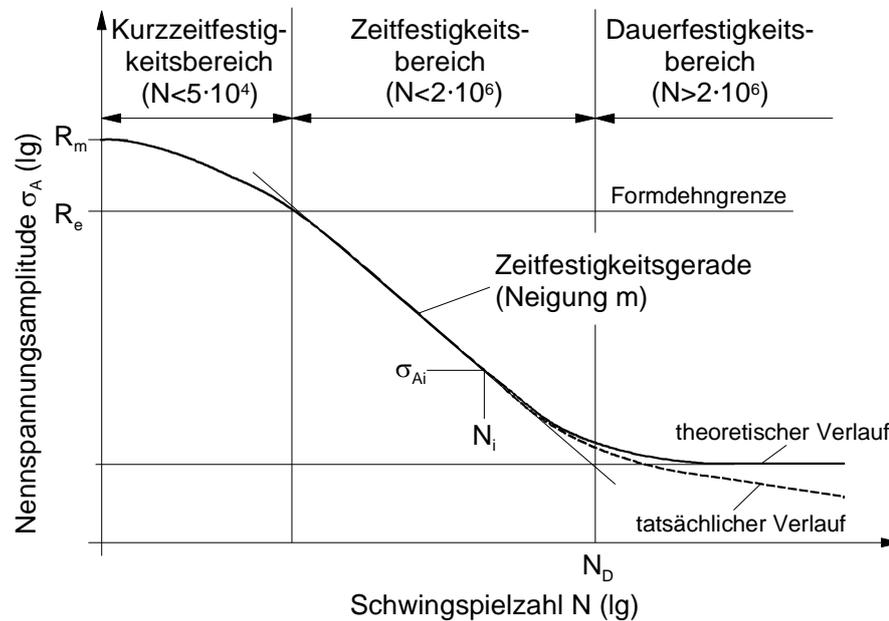


Abb. 2-5: Einteilung der Bereiche einer Wöhlerkurve

Die experimentelle Erstellung einer Wöhlerkurve bedingt die Durchführung von Schwingversuchen mit einer ausreichend hohen Anzahl an Proben. Hierbei werden auf verschiedenen Spannungshorizonten mehrere Messversuche durchgeführt und anschließend statistisch ausgewertet. Die Mittelspannung (und damit auch das Spannungsverhältnis R) bleibt bei allen Spannungshorizonten gleich. Die statistische Auswertung (und damit eine ausreichende Anzahl an Proben je Horizont) ist erforderlich, weil das zyklische Festigkeitsverhalten eines Werkstoffs in der Regel eine große Streuung aufweist. Die große Streuung resultiert aus der Vielfalt der Einflussfaktoren von der Oberflächenbeschaffenheit über eventuelle Gefügeinhomogenitäten (z.B. Poren oder Einschlüsse) bis hin zu Umgebungseinflüssen (z.B. korrosive Umgebung). Eine Kurve im Wöhlerdiagramm ist daher in der Regel mit einer Wahrscheinlichkeitsangabe (z.B. 90% Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. 10% Ausfallwahrscheinlichkeit) verknüpft, siehe **Abb. 2-6**.

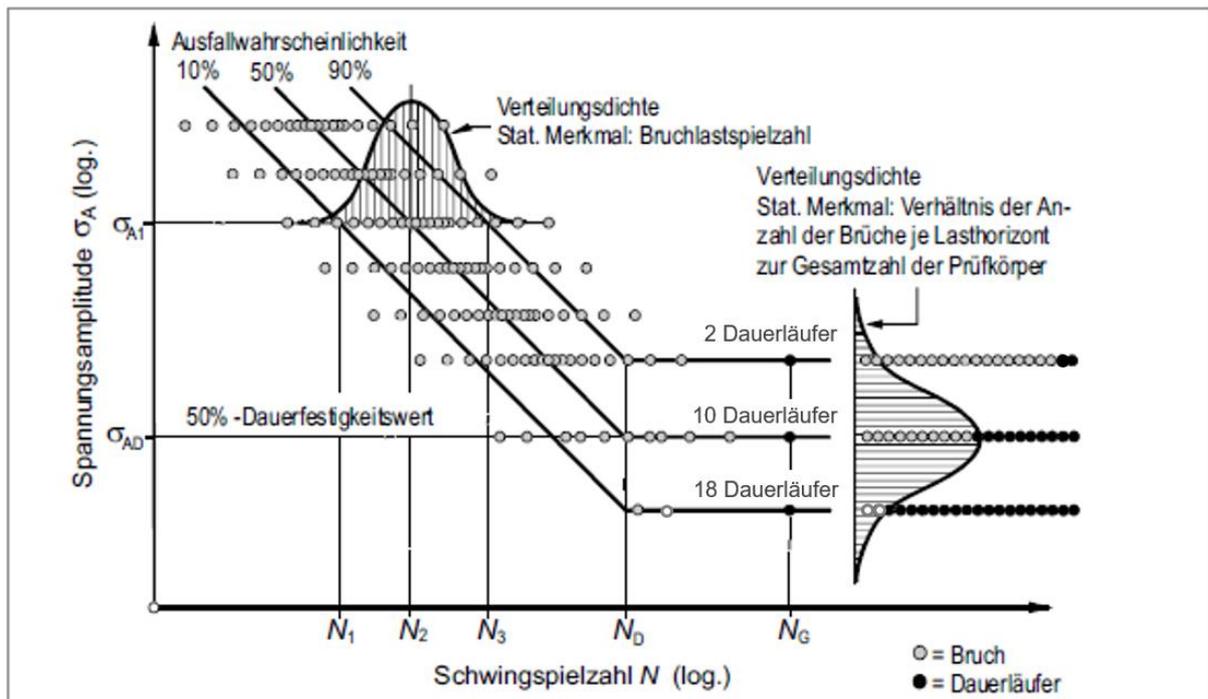


Abb. 2-6: Wöhlerkurve u. Streubreich der Lebensdauerwerte nach Gudehus u. Zenner (1995)

Der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Wöhlerkurve unterlegt man in der Regel eine Verteilungsfunktion (z.B. die Normalverteilung, die logarithmische Normalverteilung, die Weibull-Verteilung oder die $\arcsin \sqrt{P}$ -Transformation). Das Thema der statistischen Versuchsauswertung wird im Rahmen des Messtechniklabors genauer betrachtet. Abhängig von der angestrebten Informationsauflösung, kann eine geeignete statistische Funktion ausgewählt werden. Zur Ermittlung des besonders kritischen Bereichs der Dauerfestigkeit (hier ist die Streuung der Versuchsergebnisse meist am Höchsten) kommen die $\arcsin \sqrt{P}$ -Transformation oder das Treppenstufenverfahren zur Anwendung.

2.3 Kerbwirkung

Die zuvor beschriebene Beurteilung der Schwingfestigkeit eines Bauteils (=Lebensdauerabschätzung) anhand einer Wöhlerkurve setzt voraus, dass der Konstrukteur Kenntnisse über die vorliegende Beanspruchung (z.B. in Form einer Spannungsverteilung) hat. Hierzu muss der kritische Querschnitt bestimmt werden, in dem die höchsten Belastungen während der Betriebsbeanspruchung auftreten. Der Verlauf der Spannungen über dem Bauteil ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben der Art der äußeren Lastaufbringung (z.B. Zug, Druck, Biegung, etc.) spielt die geometrische Gestaltung des Bauteils eine große Rolle.

Die elementaren Beziehungen zwischen äußerer Last und einfachen, geraden prismatischen Körpern lautet wie folgt:

$$\text{Zug, Druck: } \sigma = F / A$$

$$\text{Biegung: } \sigma_B = M_B / W_B$$

$$\text{Torsion: } \tau = M_T / W_T$$

Mit σ, τ =Spannung [MPa], F = Kraft [N], M_B =Biegemoment [Nm], M_T =Torsionsmoment [Nm], A =Querschnittsfläche [mm²], W_B =Widerstandsmoment [mm³] der Querschnittsfläche um die Biegeachse und W_T =polares Widerstandsmoment [mm³] der Querschnittsfläche. Die durch die Gleichungen beschriebenen Spannungen werden wesentlich verändert, wenn die glatte Körperform eine Kerbe aufweist. Bei Kerben ist folgende Unterscheidung nützlich:

- Makroskopische Kerben (Bohrungen, Nuten, Rillen, Absätze, Vorsprünge, Schweißnähte)
- Mikroskopische Kerben (Bearbeitungsriefen, Schweißspritzer oder -krater, Rostnarben, Einschlüsse, Ausscheidungen)
- Strukturelle Kerben (Steifigkeits- oder Härtesprünge, Korngrenzen)

Durch eine solche Kerbe kommt es zu einer ungleichförmigen Spannungsverteilung und die bereits vorhandene Spannung wird lokal stark überhöht. Das lässt sich anhand des veränderten Kraftlinienverlaufs durch das Bauteil erklären, bei dem die Kerbe wie ein Hindernis wirkt und damit zu einer Konzentration des Kraftflusses im Kerbbereich führt, siehe **Abb. 2-7**.

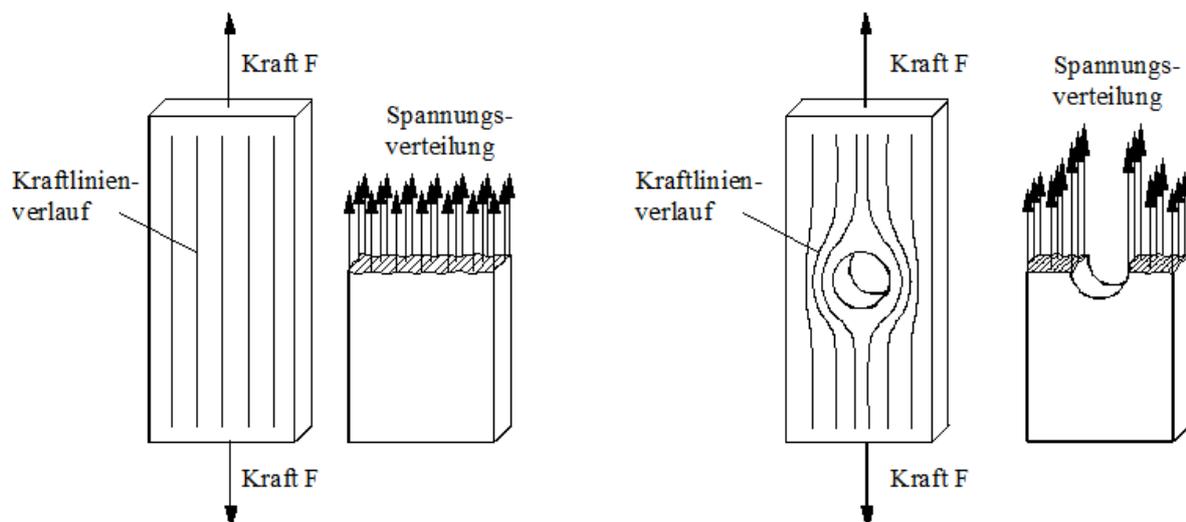


Abb. 2-7: Ungekerbte und gekerbte auf Zug beanspruchte Platte

Das Verhältnis der maximalen Spannung am Kerbrand zur Nennspannung ($\sigma = F/A_{\text{reduziert}}$ bzw. $\sigma_B = M_B/W_{B, \text{reduziert}}$ etc.) wird durch die Formzahl

$$K_t = \sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{nenn}}$$

beschrieben. In der Literatur wird für die Formzahl K_t auch häufig das Zeichen α_k verwendet. Solange die Beanspruchung im elastischen Bereich liegt, hängt der Wert der Formzahl nur von den geometrischen Abmessungen der Kerbe und der Art der Beanspruchung ab. Häufig wird diese Proportionalitätsgrenze (linear-elastisches Verhalten) jedoch durch die lokal stark ansteigende Spannungsüberhöhung überschritten und es kommt zu einer lokalen plastischen Verformung. Diese plastische Verformung bewirkt eine „Entspannung“ der kritischen Beanspruchungssituation. Hierdurch werden Spannungsspitzen durch lokal auftretende Fließvorgänge im Werkstoff abgebaut. Man bezeichnet diesen Vorgang als Makrostützwirkung, die vom jeweiligen Werkstoffverhalten abhängig ist. Die Schwingfestigkeit einer gekerbten Probe ändert sich nicht proportional, im Vergleich zur Formzahl K_t (für eine quantitative Festigkeitsanalyse benötigt man bei schwingender Beanspruchung stattdessen die Kerbwirkungszahl K_f , welche Einflussgrößen wie bspw. Werkstoffart, Werkstoffzustand, Spannungsverteilung, Kerbgeometrie etc. berücksichtigt (statt K_f wird in der Literatur auch häufig β_k benutzt). Dennoch lässt sich gemäß Buxbaum (1992) das Schwingfestigkeitsverhalten gekerbter, metallischer Prüfkörper qualitativ kennzeichnen, indem man die relative Lage von Wöhlerkurven in Abhängigkeit von K_t darstellt (siehe **Abb. 2-8**).

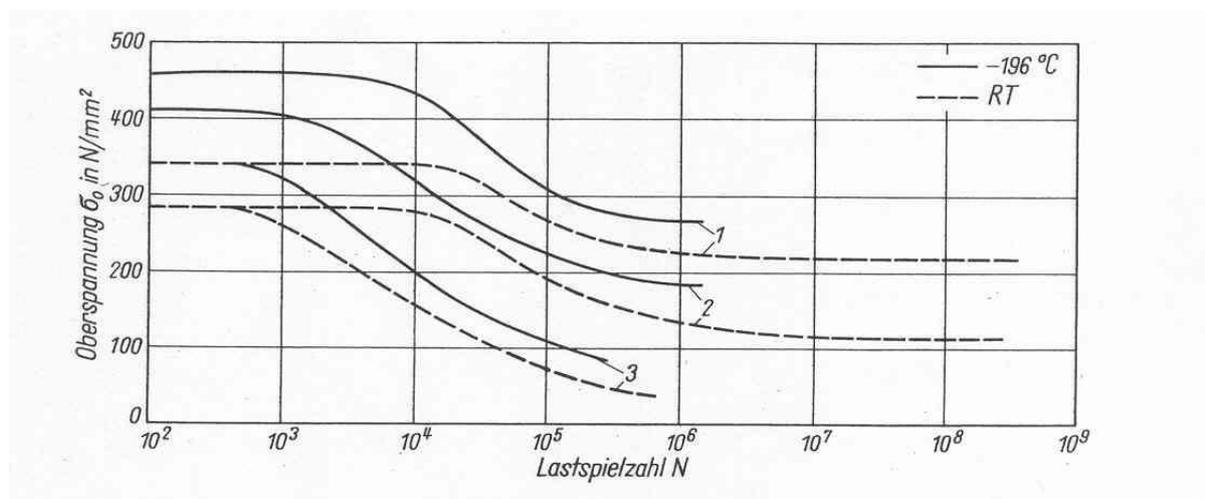


Abb. 2-8: Wöhlerkurve für AlMg4,5Mn für 1) Grundwerkstoff und 2) stumpfgeschweißte X-Naht (Zusatzwerkstoff S-AlMg4,5Mn und 3) gekerbt, $K_t > 12$

Zur Ermittlung der Formzahl K_t stehen verschiedene Diagramme zur Verfügung, welche sich jedoch auf normierte Probengeometrien beziehen (genauere Angaben siehe Aufgabenstellung). Liegt hingegen eine individuelle Proben- bzw. Kerbgeometrie vor, so kann die zugehörige Kerbwirkung mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder der Boundary-Element-Methode (BEM) ermittelt werden. Die Finite-Elemente-Methode ist heutzutage häufig Bestandteil der CAE*-Software und kommt daher auch in der Praxis zunehmend zur Auslegung von komplex gestalteten Bauteilen zum Einsatz. In **Abb. 2-9** sind sowohl ein K_t -Diagramm als auch eine Ergebnisdarstellung einer FE-Analyse für eine gelochte Platte dargestellt.

* CAE=Computer-Aided-Engineering

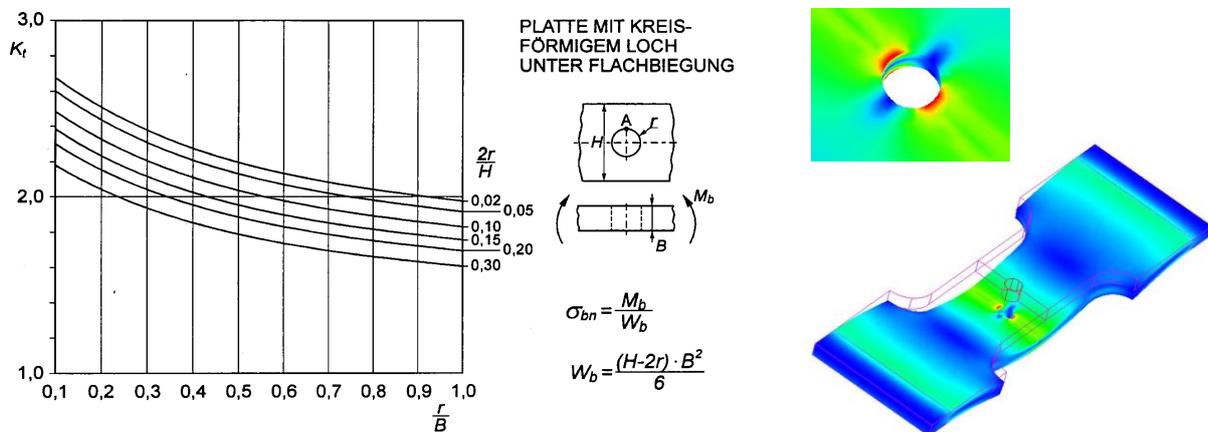


Abb. 2-9: Ermittlung der Formzahl K_t mittels Diagramm oder FE-Analyse

3. Versuchsdurchführung

3.1 Wechselbiegemaschine

Die Versuchsdurchführung erfolgt an einer Wechselbiegemaschine der Fa. TKS. Ihr mechanischer Antrieb ermöglicht eine stufenlos einstellbare Spannungsamplitude. Dies wird durch einen Doppelsexcenter auf der Antriebswelle realisiert. **Abb. 3-1** zeigt den schematischen Aufbau einer Wechselbiegemaschine. Über einen Pleuel wird der Exzenterhub auf die Antriebsschwinge übertragen und ein Biegemoment in die Probe eingeleitet. Fixiert wird die Probe an dem sog. Torsionssockel der die Belastung während der Versuchsdurchführung an die Druckmesssonde weitergibt. Das hierdurch induzierte Gegenmoment wird teilweise durch eine eingebaute Unterstützungsfeder kompensiert bzw. gedämpft. Durch die elektronische Aufnahme der Belastungen, ist die direkte Ausgabe des Biegemoments möglich. Zur Bestimmung der Bruchzyklenzahl sind die Wechselbiegemaschinen mit einem Zählwerk ausgerüstet. Eine Abschaltautomatik stoppt den Antriebsmotor bei Probenbruch.

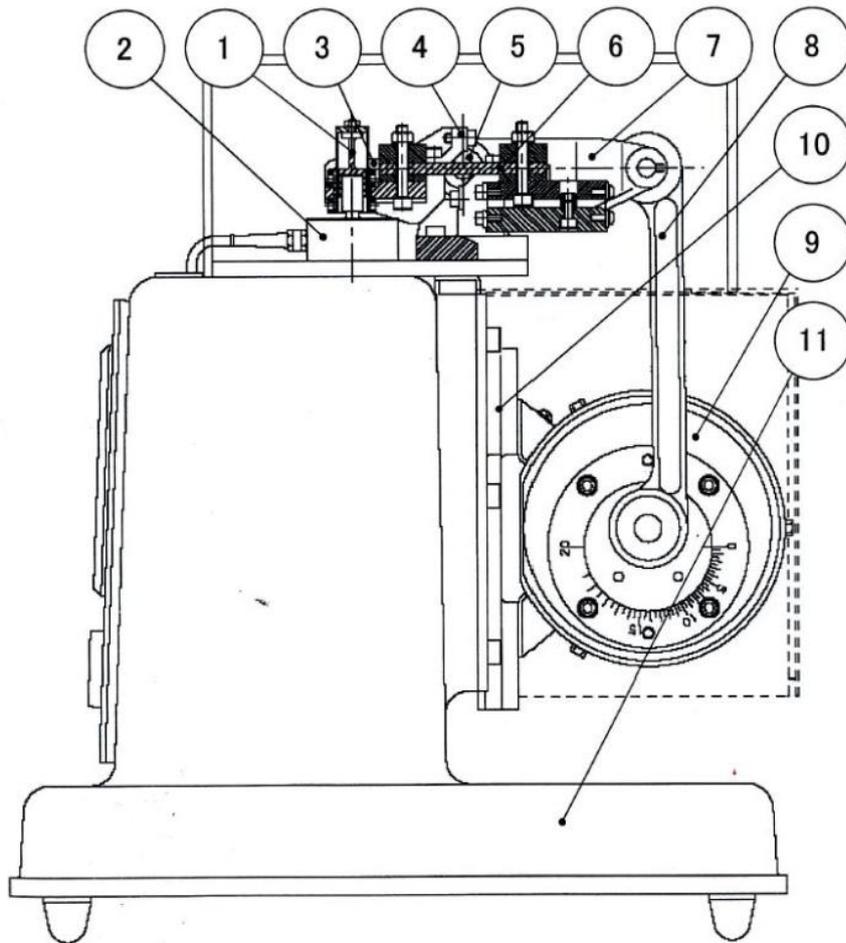


Abb. 3-1: Schematischer Aufbau der Wechselbiegemaschine PBF-30X

Nr.	Name	Funktion
1	Torsionssockel	Leitet das Biegemoment zur Druckmess-Sonde
2	Druckmess-Sonde	Misst das Biegemoment
3	Messarm	Fixiert die Probe und leitet das Biegemoment an den Torsionssockel weiter
4	Unterstützungsfeder	Dämpft die Kraft in der Längsachse während die Probe gebogen wird
5	Rotationsachse	Unterstützt die Kreisbewegung des Schwinghebels durch Führungslager. Außerdem bildet sie die Biegemittelachse
6	Probe	
7	Schwinghebel	Fixiert die Probe und bringt das Moment auf.
8	Pleuel	Leitet die exzentrische Rotation zum Schwinghebel weiter
9	Doppelsexcenter	Bestimmt durch Veränderung der Exzentrizität die Kraftamplitude
10	Motorschlitten	Leitet durch Auf- und Abbewegen die Beanspruchung ein
11	Gehäuse	Schützt die Messinstrumente und gewährleistet einen sicheren Stand

3.2 Kurze Bedienungsanleitung

Im Folgenden werden die wichtigsten Handgriffe, die zur Bedienung der Maschine erforderlich sind, stichwortartig zusammengefasst.

1. Prüfquerschnitt der Probe feststellen (messen und notieren).
2. Widerstandsmoment des Prüfquerschnittes nach $W = H \times B^2 / 6$ berechnen. (H: Probenbreite, B: Probendicke).
3. Biegemoment errechnen nach der Gleichung: $M_b = W \times \sigma$.
4. Exzenter auf den Wert Null einstellen.
5. Ausrichtung der Probenauflage zurücksetzen.
6. Probe einspannen und dabei beachten, dass die neutrale Faser der Probe in der Schwenkachse der Antriebsschwinge liegt (Unterlegplättchen 5,5 mm verwenden).
7. Motorschlittenposition bei unebenen Proben, die die Messeinrichtung vorspannen, korrigieren.
8. Um das gewünschte Biegemoment einzustellen, muss der Exzenter schrittweise verstellt werden.
9. Zählerstand des Lastspielzählers zurücksetzen.
10. Maschine starten.

Nun kann die Maschine sich selbst überlassen werden. Bei Bruch oder Anriss der Probe schaltet sie selbständig ab und das rote Kontrollfeld leuchtet auf.

11. Zählerstand des Lastspielzählers notieren.
12. Ausbau der gebrochenen bzw. gerissenen Probe.

4. Aufgabenstellung und Versuchsauswertung

Mit Hilfe der bereits durchgeführten Schwingversuchsergebnisse (als Vorstufe zur Ermittlung eines Wöhlerdiagramms) im Anhang, (**Abb. 7-3**) soll überschlägig abgeschätzt werden, mit welcher Spannungsamplitude eine Probe ohne Bohrung, mit einer Bohrung $\varnothing=1$ mm bzw. $\varnothing=6$ mm, 20.000 Zyklen erreicht. Dazu müssen die entsprechenden Formzahlen K_t berechnet werden. Mit den gelochten Proben sollen die Dauerschwingversuche durchgeführt werden, um zu überprüfen, wie genau die Lebensdauervorhersage war. (Anmerkung: Wie bereits die Abb. 2-8 in Abschnitt 2.3 zeigt, kann streng genommen eine klassische Wöhlerkurve nur für einen speziellen Kerbfall angenommen werden.)

5. Literatur

- Macherauch, Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg, Braunschweig, 1992.
- Issler, Ruoß, Häfele, Festigkeitslehre – Grundlagen, Springer, Berlin, 1997.
- Schott (Hrsg.), Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit, DVG, Stuttgart, 1997.
- Ruge, Wohlfahrt, Technologie der Werkstoffe, Vieweg, Braunschweig, 2002.
- Rösler, Harders, Bäker, Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, Teubner, Stuttgart, 2003.
- Radaj, Ermüdungsfestigkeit, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2003
- Buxbaum, Betriebsfestigkeit, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1992
- Haibach, Betriebsfestigkeit, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2002
- Naubereit, Weihert, Einführung in die Ermüdungsfestigkeit, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1999
- Gudehus, Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1999
- Läßle, Einführung in die Festigkeitslehre, Verlag Vieweg + Teubner, 2008

6. Kontrollfragen

- Warum ist das Werkstoffverhalten bei schwingender Belastung von Bedeutung?
- Erläutern Sie die wesentlichen Kenngrößen einer zyklischen Beanspruchung (R , σ_m , σ_o , σ_u , σ_a)?
- In welche Bereiche werden schwingende Belastungen eingeteilt?
- Was wird in einem Wöhlerdiagramm dargestellt und wozu wird es benötigt?
- In welche Bereiche wird eine Wöhlerkurve unterteilt?
- Nennen Sie Gründe für die Streuungen bei Dauerschwingversuchen!
- Wieso ist eine statistische Berechnung der Wöhler-Kurve notwendig?
- Welche Arten von Kerben unterscheidet man?
- Welchen Effekt haben Kerben auf den Spannungsverlauf?
- Was drückt der Kennwert K_t aus und wie wird er ermittelt?
- Beschreiben Sie die Funktionsweise einer Wechselbiegemaschine!

7. Anhang

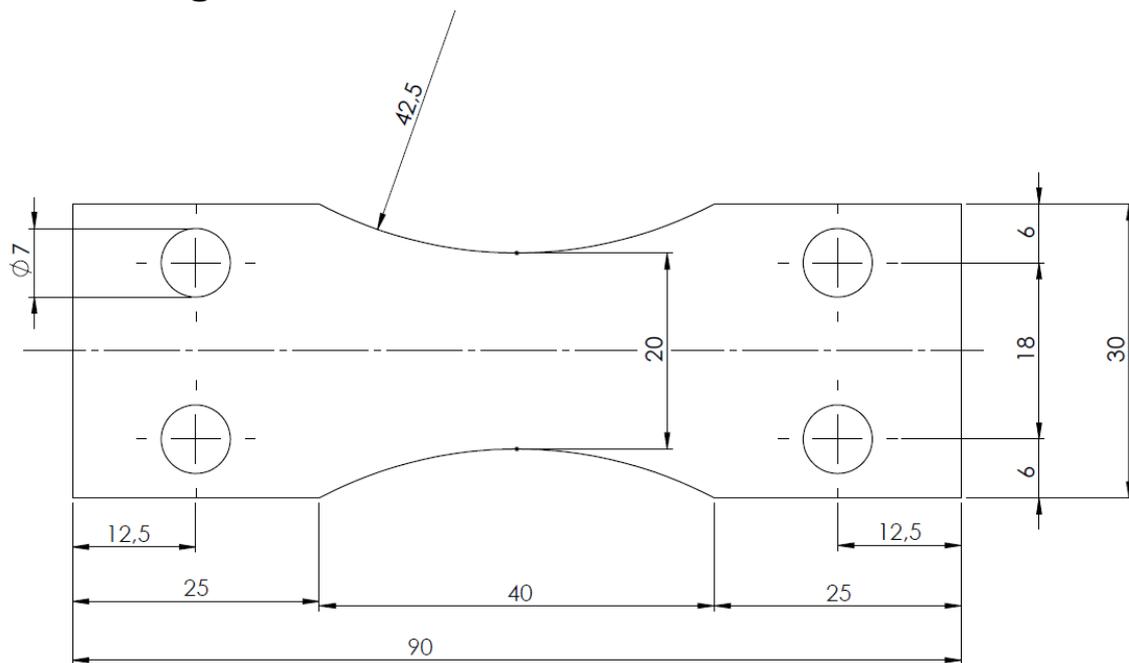


Abb. 7-1: Probenform für Wechselbiegemaschine ohne Loch, Probendicke 3mm

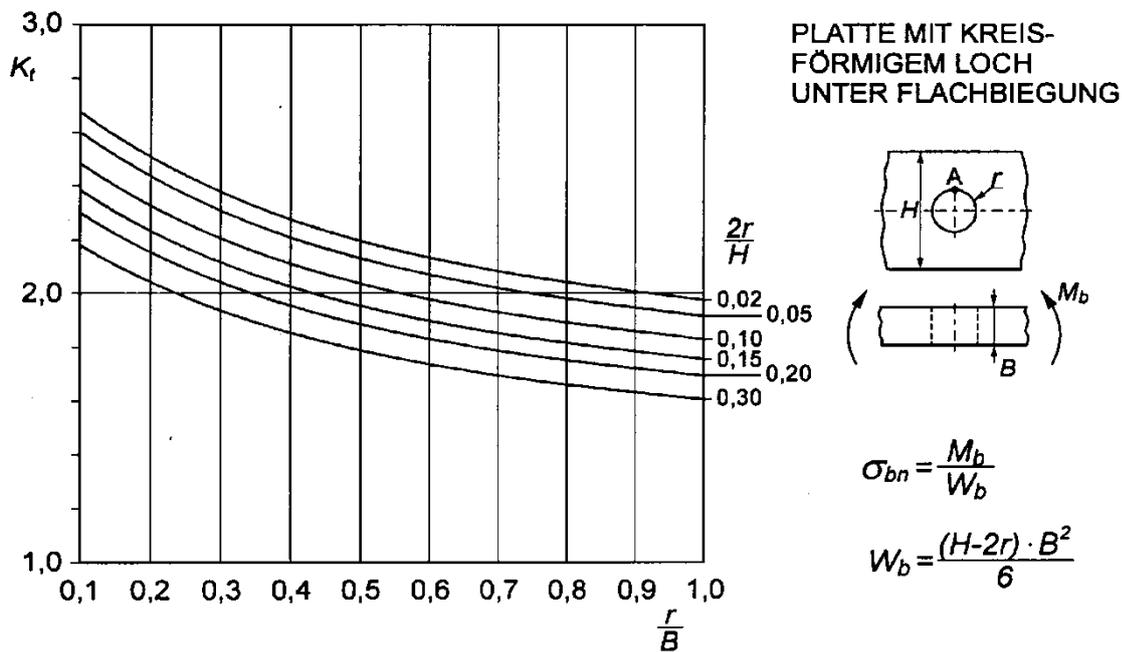


Abb. 7-2: Formzahldiagramm für Flachstab unter Flachbiegebelastung mit mittiger kreisförmiger Bohrung

$$K_t = \left[1,79 + \frac{0,25}{0,39 + (2r/B)} + \frac{0,81}{1 + (2r/B)^2} - \frac{0,26}{1 + (2r/B)^3} \right] \cdot \left[1 - 1,04 \cdot \left(\frac{2r}{H} \right) + 1,22 \cdot \left(\frac{2r}{H} \right)^2 \right]$$

Gleichung 7-1: Gleichung zur Berechnung von K_t

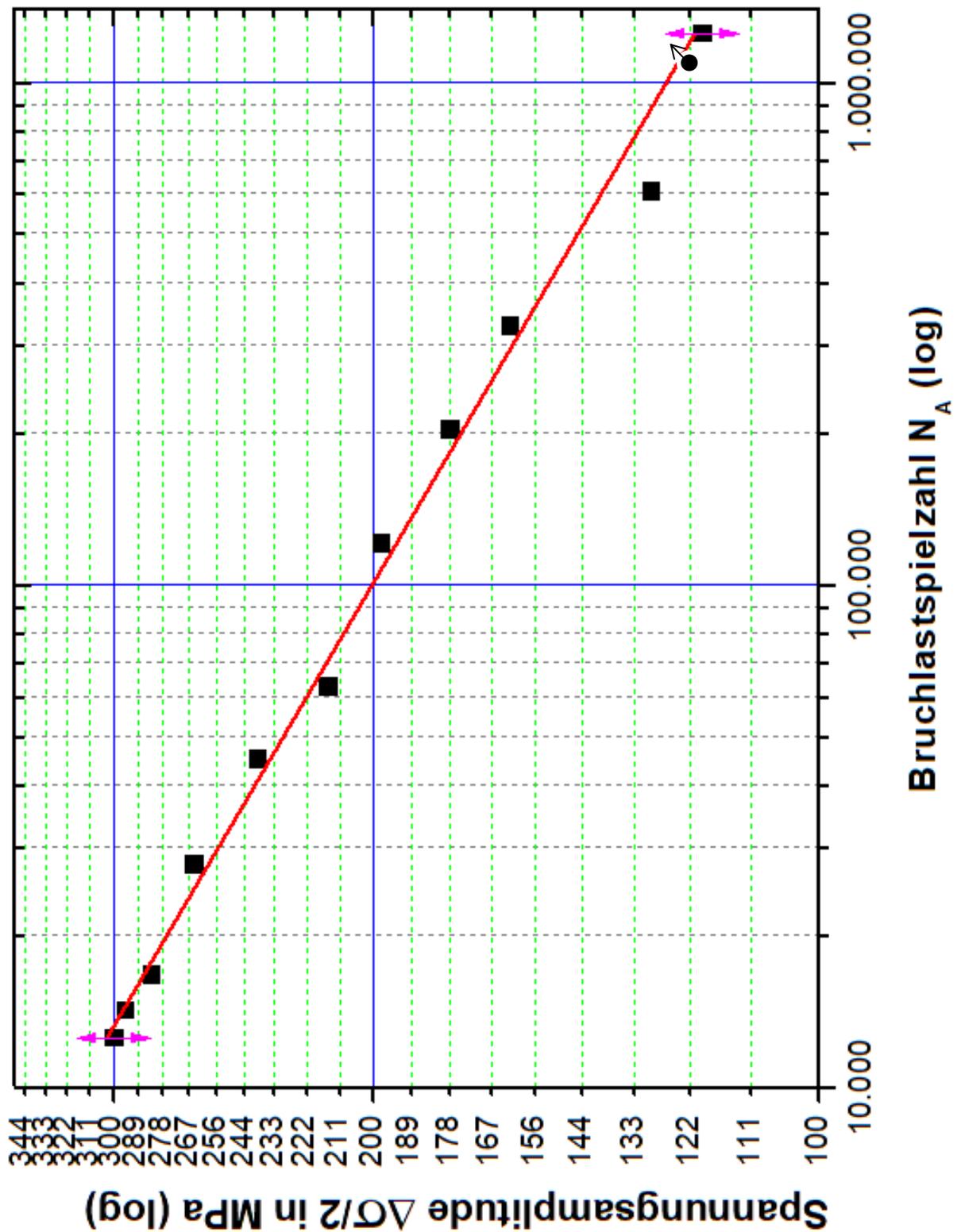


Abb. 7-3: Schadenslinie: Ermittlung der Schwingspiele bei vorgegebener Spannungsamplitude, für eine Wechselbiegeprobe nach DIN 50100, AlMgSi1

Formelzeichen: Festigkeit bei zyklischer Beanspruchung

$\sigma_a; \sigma_A$	Amplitudenspannung, Spannungsamplitude ⁽¹⁾	MPa
$a; A$	Indizes klein wenn Versuchsauswertung oder groß wenn Anwendung im Vordergrund steht	
σ_o	Oberspannung	MPa
σ_u	Unterspannung	MPa
σ_m	Mittelspannung ⁽²⁾	MPa
R	Spannungsverhältnis ⁽³⁾	$R = \sigma_u / \sigma_o$
R_m	Zugfestigkeit	N/ mm ²
R_e	Streckgrenze	N/ mm ²
P_a	Ausfallwahrscheinlichkeit	
$P_{\ddot{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit	
$\arcsin \sqrt{P}$	Treppenstufenverfahren	
σ, τ	Spannung, Torsion	MPa
F	Kraft	N
A	Querschnittsfläche	mm ²
M_B	Biegemoment	Nm
M_T	Torsionsmoment	Nm
W_B	Widerstandsmoment	mm ³
W_T	Polares Widerstandsmoment	mm ³
K_t	Formzahl, max. Spannung am Kerbrand	$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nenn}}$
K_f	Kerbwirkungszahl	
N_f	Bruchzyklenzahl	
N	Lastspielzahl, Schwingspielzahl	