

# Stahlbau II - SS 2016

## 8. Vorlesung / Übung

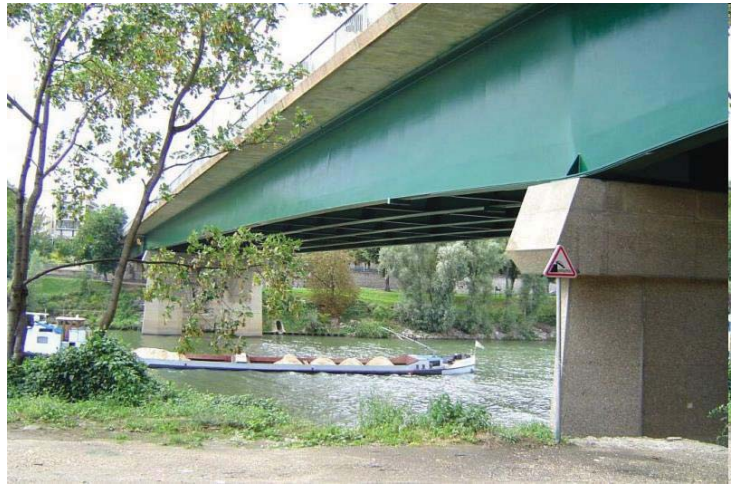
Daniel Pak

16.06.2016



## Terminübersicht und Übungsinhalte

Termin	Thema	Inhalt
14.04.2016	Hallenbau	Tragwerksentwurf, Detaillösungen
21.04.2016	Hallenbau	Tragwerksentwurf, Detaillösungen
28.04.2016	Stabilität	Theorie 2. Ordnung
19.05.2016	Stabilität	Theorie 2. Ordnung, Verbände und Aussteifungen
02.06.2016	Stabilität	Biegeknicken von Stabtragwerken, Rahmen Biegedrillknicken
09.06.2016	Sonderfragen der Bemessung	Örtliche Lastenleitung / Rahmenecken
<b>16.06.2016</b>	<b>Ermüdung</b>	<b>Grundlagen, Anwendungsverfahren, Berechnungsbeispiele</b>
23.06.2016	Ermüdung	Anwendungsverfahren, Berechnungsbeispiele
30.06.2016	Schweißverfahren	Vertiefte Kenntnisse des Schweißens
07.07.2016 / 14.07.2016 21.07.2016	Ausweichtermin bzw. Fragen zur Klausur	



## Normen

- Erhältlich als Download in [www.perinorm.com](http://www.perinorm.com)  
DIN EN 1993-1-9:2010 + **NA**



## Weitere Literatur

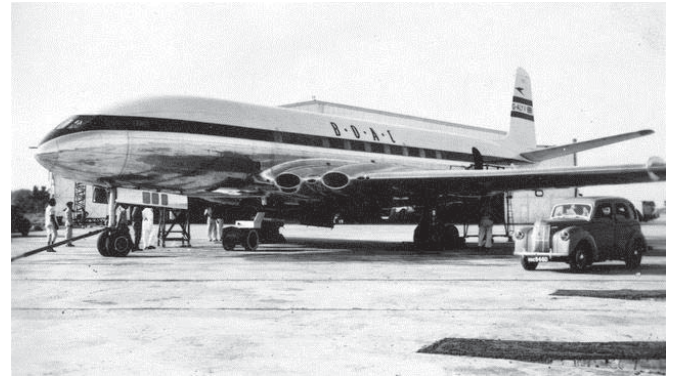
- Roik, K.: Vorlesungen über Stahlbau, Verlag Ernst und Sohn, Berlin/München/Düsseldorf
- Bode, H.: Stahlbau III
- Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Vieweg Verlag, Braunschweig/München 1982

27.07.1949

Der Prototyp der DH-106 Comet startet als erstes ziviles Düsenverkehrsflugzeug zum Erstflug (42 Passagiere, 800 km/h, 12.000 m Flughöhe)

02.05.1952

Die British Overseas Airways Corporation (BOAC) nimmt den Liniendienst der De Havilland Comet auf



De Havilland DH 106 Comet, G-ALYV. Quelle: Matthew Clarkson

02.05.1953: Absturz der G-ALYV (Flug 783), 6 Minuten nach dem Start vom Flughafen Kalkutta (Vermutung zur Unfallursache: schlechte Wetterverhältnisse)

10.01.1954: Absturz der G-ALYP (Flug 781), 26 Minuten nach dem Start in Rom, in der Nähe der Insel Elba (Explosion in der Luft); Churchill beauftragt die Royal Navy mit der Bergung des Fluges, zeitweilige Stilllegung der Comet-Flotte am 12.01.1954

23.03.1954: Aufhebung des Flugverbotes (vermutete Absturzursache: Motorschaden)

08.04.1954: Absturz der G-ALYY (Flug 201), 40 Minuten nach Start in Rom über dem Meer nahe Neapel (Explosion in der Luft), Flugverbot für die gesamte Comet-Flotte

5

Stahlbau II / Sommersemester 2016



## Ermüdung: Grundlagen

19.10.1954: Einrichtung des Cohen Komitees zur Klärung der Unfallursache beider Abstürze

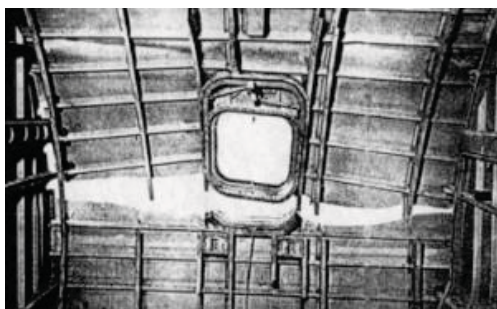
Durchführung von Druckversuchen an der Comet G-ALYU in einem Wassertank:

- Füllen des Tanks mit Wasser
- Zyklische Variation des Wasserdrucks im Flugzeug zur Simulation des Überdrucks

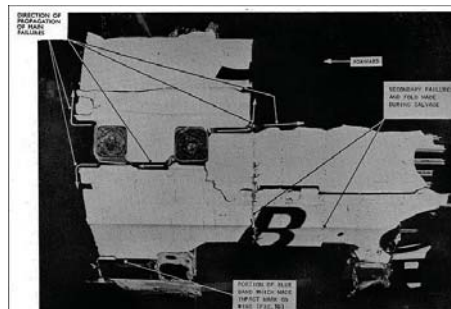


G-ALYU im Wassertank, Quelle: Royal Airforce Museum

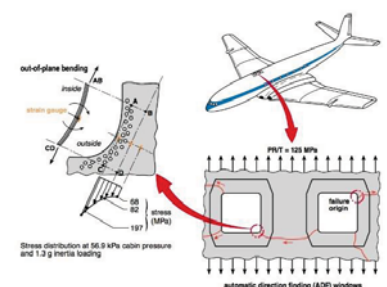
Nach 1.230 Flügen + 1.830 Lastwechseln im Wassertank: Ermüdungsversagen an der Ecke eines der rechteckigen Fenster



Versagen des Rumpfes (G-ALYU im Wassertank), Quelle: Federal Aviation Administration



gebogene Wrackteile Flug 781, Quelle: Federal Aviation Administration



Rissinitierung, G-ALYU, Quelle: the Aerospace Engineering Blog

6

Stahlbau II / Sommersemester 2016





### Untersuchungen von August Wöhler (ab 1860)

August Wöhler (1819 – 1914), Ingenieur im Eisenbahnbau und später Mitglied im technischen Ausschuss des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen, untersuchte die Dauerbelastungen von Eisenbahnteilen. Dabei erkannte er, dass ein **Werkstoff, der wechselnden Beanspruchungen ausgesetzt ist, eine geringere Belastbarkeit hat als statisch belastete Werkstoffe.**



Viele der im Ingenieurbau eingesetzten metallischen Bauteile oder Strukturen unterliegen einem ständigen **Wechsel der Belastung**. Diese zyklischen Lastgeschichten verursachen Veränderungen der Mikrostruktur des Materials, die sich auf die Festigkeit metallischer Werkstoffe und somit auf die Lebensdauer des Bauteiles auswirken.

Das Phänomen des **Schädigungszuwachses aufgrund von zyklischer Belastung** wird als Ermüdung (engl.: fatigue) bezeichnet.



Dauerzugversuchsmaschine von August Wöhler, Quelle: Deutsches Museum



Entgleisung der Amstetten durch Ermüdungsbruch des Radreifens 1875  
Quelle: wikipedia.de

## Ermüdung: Grundlagen

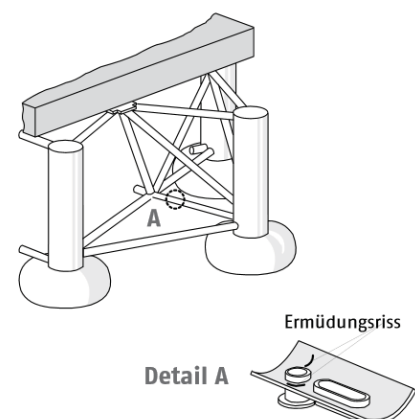
### Definition „Ermüdung“:

Prozess der **Rissbildung** und des **Rissfortschritts** in einem Bauteil, hervorgerufen durch wiederholte **Spannungsschwankungen** (Spannungsschwingbreiten), wobei in der Regel die Streckgrenze nicht erreicht wird (Beanspruchungshöhe liegt unter der Bauteilfestigkeit bei statischer Belastung).

⇒ 3. Grenzzustand neben GZT (ULS) und GZG (SLS)



Details der aufgrund von Ermüdung gekenterten Bohrplattform (Nordsee, 1980)  
Quelle: Ruhr-Uni Bochum

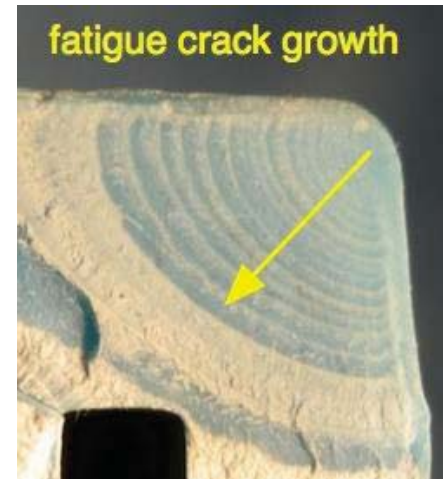


Unter Wechselbelastung kann sich ein Riss in "kleinen Schritten" ausbreiten, zum Beispiel in einer Größenordnung von  $10^{-6}$  mm pro Zyklus. Bei diesem sogenannten **Ermüdungsrisswachstum** handelt es sich um ein Phänomen, das sich bei allen rissbehafteten, schwingend beanspruchten Bauteilen beziehungsweise Probekörpern beobachten lässt. Die für die Rissinitiierung und Rissausbreitung erforderliche Belastung liegt hierbei deutlich unter der Belastung, die bei einer statischen Beanspruchung nötig wäre. Allerdings ist eine Vielzahl von Lastwechseln nötig.

Auch der Vorgang der Rissausbreitung lässt sich weiter differenzieren:

- Ein Risswachstum heißt **stabil**, wenn für eine Rissvergrößerung eine Erhöhung der äußeren Belastung erforderlich ist.
- Ein Risswachstum heißt **instabil**, wenn sich ein Riss von einem bestimmten Punkt an ohne weitere Erhöhung der äußeren Last spontan ausbreitet.

In beiden Fällen haben außer den Werkstoffeigenschaften auch die Geometrie des Bauteils beziehungsweise Probekörpers und die Art der Belastung einen großen Einfluss und müssen berücksichtigt werden.

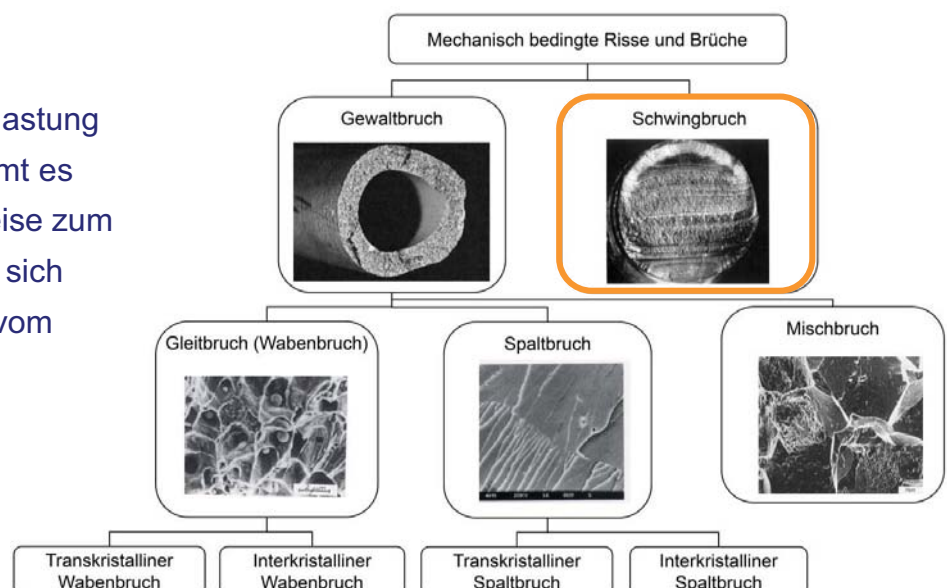


Quelle: leancrow.com

## Ermüdung: Grundlagen

Der Bruchvorgang und der Risswachstumsprozeß stehen in unmittelbarer Verbindung zueinander, und lassen sich beide nach klar differenzierbaren Gesichtspunkten klassifizieren. So kennt man für das Verhalten eines Risses bei einer Belastung typische Phasen:

- solange ein Riss seine Größe nicht ändert, spricht man von einem **stationären Riss**
- wird eine bestimmte kritische Belastung oder Deformation angelegt, kommt es zur Rissinitiierung beziehungsweise zum Risswachstum. Der Riss beginnt sich auszubreiten. Man spricht dann vom **instationären Riss**



Quelle: Prof. Dr. Martina Zimmermann, TU Dresden

## Ursachen der Werkstoffermüdung:

Die Ermüdung metallischer Werkstoffe infolge veränderlicher, schwingender Beanspruchung basiert auf mikro- und makrostrukturellen Änderungen des Werkstoffgefüges ausgelöst durch zyklische plastische Verformungen.

Diese Veränderungen des Gefüges setzen die Beanspruchbarkeit des Materials herab. Deswegen versagen derartig beanspruchte Bauteile häufig weit unterhalb ihrer theoretischen Streckgrenze.



Quelle: Liebherr



Quelle: Hildenbrand Ingenieure



Quelle: Schicks Abgastechnik



Quelle: wikipedia



Quelle: VG Linz



Quelle: SSF Ingenieure

# Ermüdung: Grundlagen

## Ursachen der Werkstoffermüdung:

sprunghafte Versetzung einzelner Kristallbereiche als Gleitpaket um mehrere Atomlagen



„Stauung“ der Versetzungen an Hindernissen (Korngrenzen, Einschlüsse)



mikrostrukturellen Änderungen im Werkstoffgefüge (makroskopische Verfestigung)

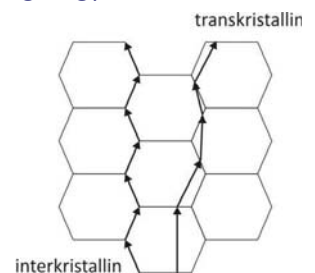


örtlicher starker Anstieg von Spannungen



lokale Bildung von Mikrorissen:

- **transkristalliner Spaltriss:** Auflösung der Bindungen entlang von Gleitebenen
- **interkristalliner Bruch:** Separation entlang der Korngrenzen
- **Gleitbruch:** Porenbildung an Stelle des Mikrorisses (Vereinigung beim Bruch)



## Ursachen der Werkstoffermüdung:

lokale Bildung von Mikrorissen



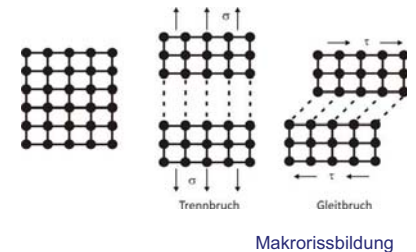
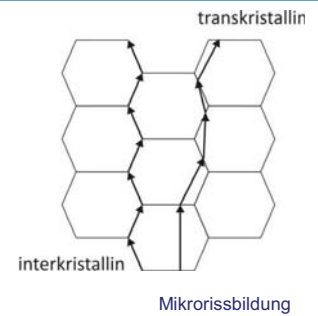
Erweiterung zu Makrorissen



Erreichen einer bestimmten Beanspruchung:  
Rissinitiierung, instationärer Riss

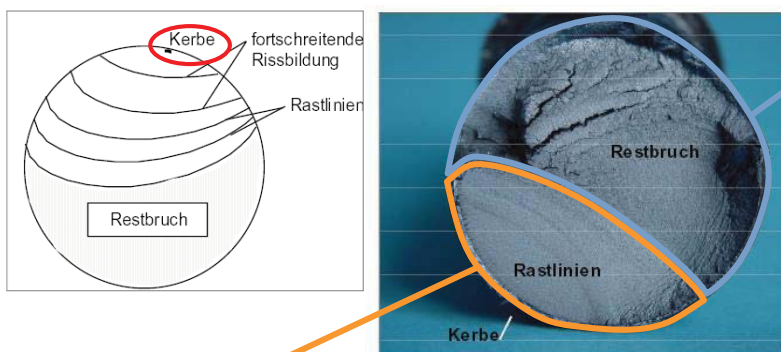


Schwing- oder Ermüdungsbruch:  
Hervorgerufen durch zyklische Beanspruchung



# Ermüdung: Grundlagen

## Bruchformen: Ermüdungsbruch + Spröbruch = Mischbruch



### 1. Rissfortschritt bei wechselnder Belastung (Ermüdung)

Schwing- oder Ermüdungsbruch: hervorgerufen durch zyklische Beanspruchung

- Risseinleitung im Mikrobereich durch Spannungsspitzen an der Unstetigkeitsstelle
- Rissausbreitung durch ständig steigende Spannungen an der Rissspitze (duktiler Bereich)

### 2. Bruch bei Überbelastung (Nettoquerschnittsversagen)

Spröbruch oder Duktilbruch:

- Spröbruch:  
Unendlich schnelles Risswachstum, da sich die Querschnittsfläche verringert und sich die Spannungen maximieren (**Metalle bei „tiefen“ Temperaturen, Zähigkeitstieflage**)
- Duktilbruch / Zähbruch:  
Bauteilversagen, einhergehend mit großen plastischen Deformationen (plastisches Fließen) (Metalle bei „normaler“ oder „hoher“ Temperatur, Zähigkeitshochlage)



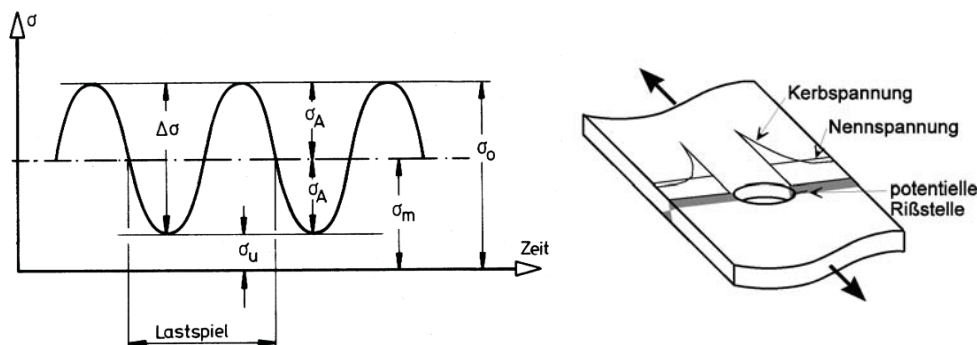
## Ermüdungsfestigkeit

Wenn ein Bauteil einer zyklisch wechselnden Beanspruchung ausgesetzt ist, kann nach einer endlichen Anzahl an Lastzyklen ein plötzlicher Bruch eintreten. Die maximale Belastung, die bei unendlicher Zahl von Belastungszyklen nicht zum Bruch führt, wird als die Ermüdungsfestigkeit des Stahls bezeichnet.



Wie hoch ist die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils?

Welche Parameter haben einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten?



## Ermüdung: Einflussparameter

### Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten:

**Werkstoff**  
Gefügebildung, Schweißseignung

**Schweißtechnik**  
Eigenspannungen,  
Nahtunregelmäßigkeiten, Nahtgefüge

**Geometrie**  
Bauteilform, Stoßform, Nahtart,  
Nahtlage, Kraftfluss, Kerbwirkung

**Belastung**  
Anzahl, Art, Richtung,  
Belastungskollektiv, Mittelspannung,  
Mehrachsigkeit



Quelle: DYNATEC GmbH

**Ermüdungs-  
festigkeit**



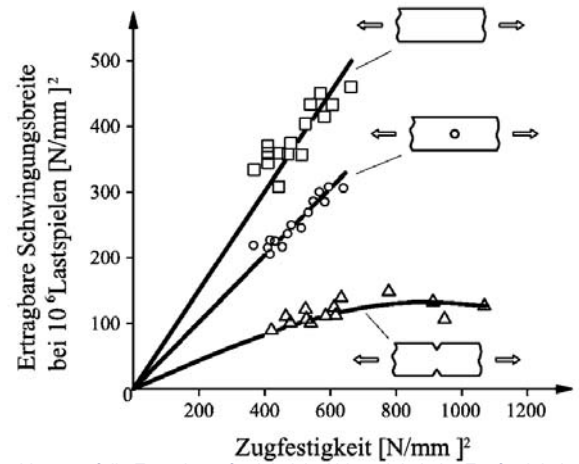
## Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten, Werkstoff:

Der Einfluss der **stahlbautypischen Werkstoffe (S235 und S355)** bzw. derer Zugfestigkeiten auf die Ermüdungsfestigkeit ist gering. In den Normen und Richtlinien werden daher die Ermüdungsnachweise **unabhängig von der Streckgrenze** geführt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kerbempfindlichkeit bei **höherfesten Stählen** zunimmt und somit keine Vorteile im Vergleich zu normalfesten Stählen auftreten.

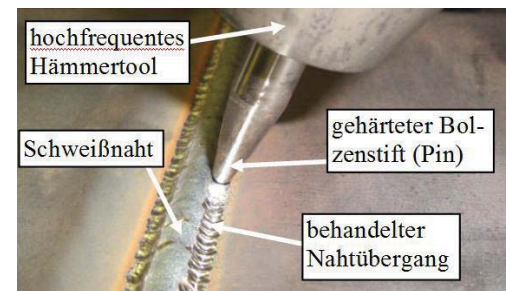


Mögliche Nachbehandlungsmethoden nur Nutzung des hohen Festigkeitspotentials höherfester Stähle in ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen:

- Verringerung der Kerbschärfe am Schweißnahtübergang (Überschleifen)
- Erzeugung von Druckeigenspannungen am Schweißnahtübergang (z.B. durch Strahlen, Hämmern, Ultrasonic Impact Treatment (UIT))



Einfluss der Kerbwirkung auf die Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit  
Quelle: Kuhlmann et.al, Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten höherfesten Baustählen durch Anwendung von Nachbehandlungsverfahren



Einbringen von Druckeigenspannungen durch hochfrequentes Hämmern,  
Quelle: Schaumann & Keindorf Ingenieurges. mbH

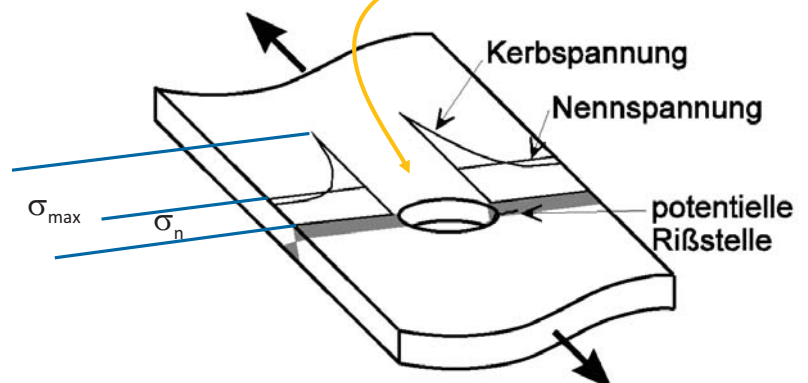
## Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten, Geometrie / Kerben:

Einfluss auf Ermüdungsversagen nehmen geometrische Unstetigkeiten, da hier die realen Spannungen wesentlich über den mit der Festigkeitstheorie ermittelten Nennspannungen liegen

- makrogeometrische Kerben (strukturbedingt)
- mikrogeometrische Kerben (Einbrandkerben, Nahtüberhöhung, Poren, Einschlüsse, Bindefehler, ...)
- metallurgische Kerben (metallurgische Veränderungen)

Nennspannung: 
$$\sigma_n = \frac{F}{A}$$

Kerbspannung: 
$$\sigma_{max}$$



### Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten, Geometrie / Größen- und Oberflächeneinfluss:

In der Regel nimmt die Ermüdungsfestigkeit mit wachsender Proben- oder Bauteilgröße ab.

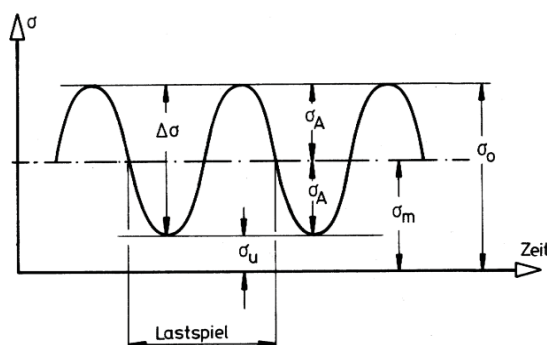
Gründe hierfür sind:

- **höhere Eigenspannungen** in realen Strukturen (großen Bauteilen) im Vergleich zu kleineren Bauteilen, hervorgerufen durch wesentlich größere Einflüsse aus Verformungsbehinderungen
- Anstieg der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins **ermüdungsfestigkeitsreduzierender Fehlstellen** im Material mit zunehmender Bauteilgröße bzw. Bauteiloberfläche
- **rauere Oberflächen** realer Strukturen im Vergleich zu den Oberflächen von Kleinproben.

## Ermüdung: Einflussparameter

### Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten, Belastung:

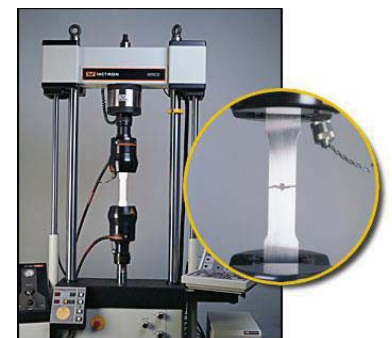
Die maßgebende Größe, die neben der Kerbwirkung zum Versagen führt, ist die Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  als Differenz der maximalen und minimalen Spannung. Diese wird bei periodischer Beanspruchung auch als Ober- und Unterspannung bezeichnet.



$$\begin{aligned}\sigma_o &= \text{„Oberspannung“} \\ \sigma_u &= \text{„Unterspannung“} \\ \sigma_m &= (\sigma_o + \sigma_u) / 2 \\ \sigma_a &= (\sigma_o - \sigma_u) / 2 \\ \Delta\sigma &= \sigma_o - \sigma_u\end{aligned}$$

$\sigma_o$  = „Oberspannung“  
 $\sigma_u$  = „Unterspannung“  
 $\sigma_m$  = „Mittelspannung“  
 $\sigma_a$  = „Spannungsamplitude“  
 $\Delta\sigma$  = „Spannungsschwingbreite“

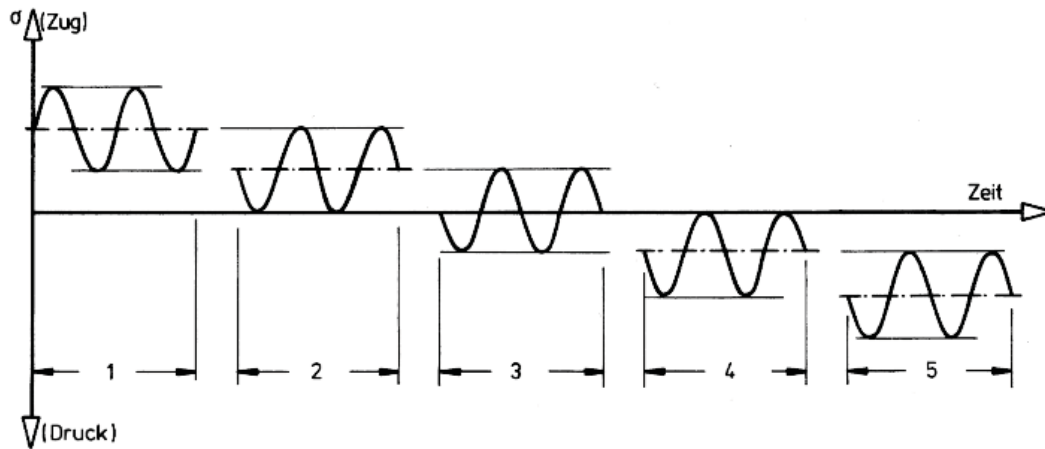
- $\Delta\sigma$  groß  $\rightarrow$  wenige Spannungsspiele möglich, geringe Lebensdauer
- $\Delta\sigma$  klein  $\rightarrow$  viele Spannungsspiele möglich, große Lebensdauer



Quelle: coldwork.com

## Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten, Grenzspannungsverhältnis R

$R = \min \sigma / \max \sigma$  (min  $\sigma$  ist der betragsmäßig kleinere Wert, der aber mit Vorzeichen einzusetzen ist)



1: Zugschwellbeanspruchung	$\sigma_o > 0; \sigma_u > 0$	$0 < R < 1$
2: Zugursprungsbeanspruchung	$\sigma_o > 0; \sigma_u = 0$	$R = 0$
3: Reine Wechselbeanspruchung	$\sigma_o = -\sigma_u$	$R = -1$
4: Druckursprungsbeanspruchung	$\sigma_o = 0; \sigma_u < 0$	$R = 0$
5: Druckschwellbeanspruchung	$\sigma_o < 0; \sigma_u < 0$	$0 < R < 1$



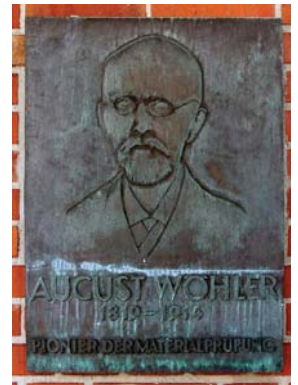
Quelle: weldsmith.co.uk

## Ermüdung: Wöhlerlinien

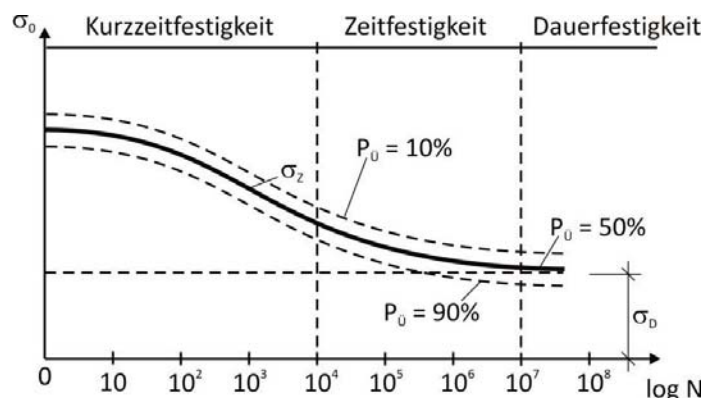
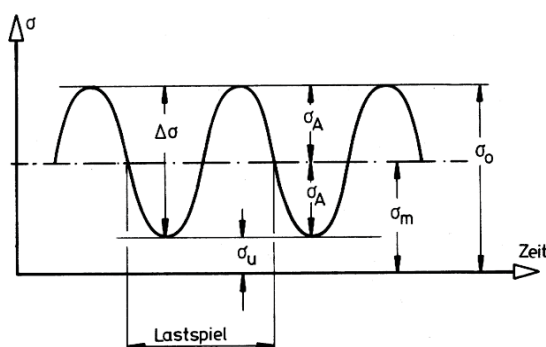
### Wöhlerversuche

...zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Konstruktionswerkstoffen unter schwingender Beanspruchung.

1. Probekörper wird unter harmonischer Belastung bis zum Bruch geführt (bei konstanter Ober- und Unterspannung)
2. Eintrag der Bruchlastspielzahl  $N$  mit zugehörigen Spannungsschwingbreite (bezogen auf **Nennspannungen**  $\sigma_n$ ) in Diagramm (Nennspannung = Bruttolspannung, d.h. Spannung bezogen auf den Ursprungsquerschnitt)

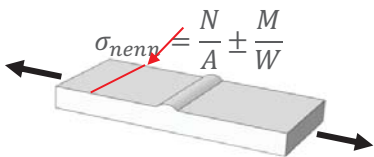
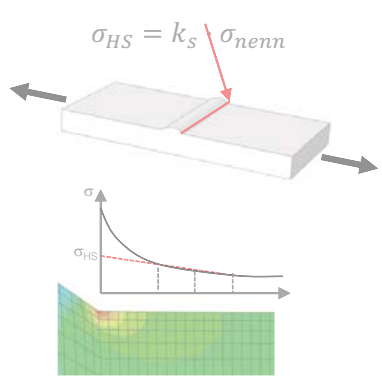
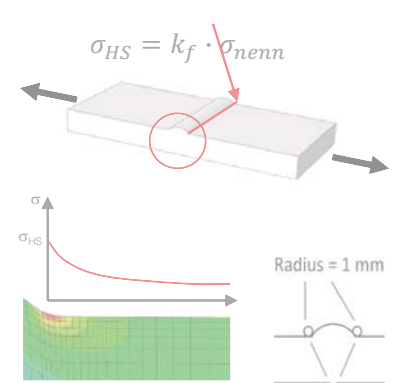


Quelle: wikipedia.de





## Wöhlerversuche

Nennspannungen	Strukturspannungen	Kerbspannungen
<p>Methoden (analytisch)</p> <p>Biegetheorie</p> $\sigma_{nenn} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$ 	<p>Methoden (numerisch)</p> <p>FEM</p> $\sigma_{HS} = k_s \cdot \sigma_{nenn}$ 	<p>Methoden (numerisch)</p> <p>FEM</p> $\sigma_{HS} = k_f \cdot \sigma_{nenn}$ 

## Wöhlerversuche

Nennspannungen	Schweißtechnik Eigenspannungen, Nahtunregelmäßigkeiten, Nahtgefüge	
Methoden (analytisch)	Geometrie Bauteilform, Stoßform, Nahtart, Nahtlage, Kraftfluss, Kerbwirkung	
<p>Biegetheorie</p> $\sigma_{nenn} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$ 	Belastung Anzahl, Art, Richtung, Belastungskollektiv, Mittelspannung, Mehrachsigkeit	

Werden die Einflussparameter (z.B. Geometrie) geändert, ändert sich bei gegebener Spannungsschwingbreite die Bruchlastspielzahl N

- Die Wöhler-Linie entsteht als Kurve aus den an **gleichen Prüfkörpern** ermittelten Bruchlastspielzahlen (d.h. für jeden Prüfkörper gibt es eine eigene Wöhlerlinie)

➡ **Ermüdungsfestigkeitskurven, „Wöhler-Kurven“**

## Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

Punkte der Wöhler-Linie geben an, wie viele Lastwechsel ein Konstruktionsdetail bei vorgewählter Mittelspannung und Spannungsschwingbreite (einstufiges Belastungskollektiv) bis zum Bruch ertragen kann. Die Wöhlerlinien sind Ergebnis der Auswertung mehrerer Versuche.

Verschiedene Festigkeitsbereiche sind erkennbar:

### • Kurzzeitfestigkeit (LCF – low cycle fatigue)

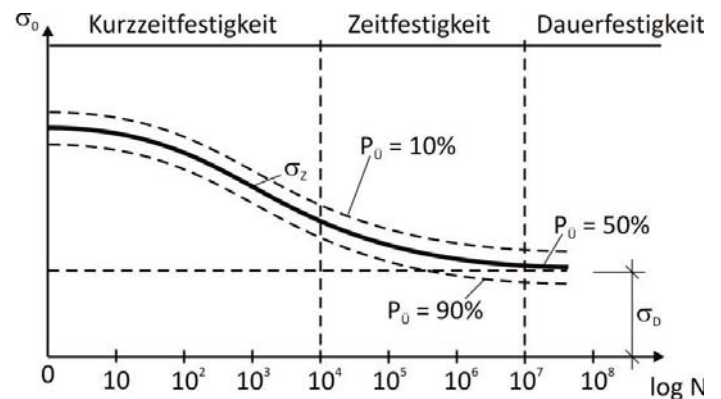
- Bereich unter  $10^4$  Lastspiele
- Bruchvorgang ist durch plastisches Fließen gekennzeichnet

### • Zeitfestigkeitsbereich $\sigma_z$

- Bereich zwischen  $10^4$  bis  $10^6 - 10^7$  Lastspiele
- stark fallende Wöhlerlinie

### • Dauerfestigkeitsbereich ( $\sigma_D$ )

- Bereich ab  $10^6 - 10^7$  Schwingspiele
- Bereich der gerade nicht mehr zum Ermüdungsbruch führt



# Ermüdung: Wöhlerlinien

## Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

$\Delta\sigma_c$  für  $N_c = 2 \cdot 10^6$  : **Bezugswert**

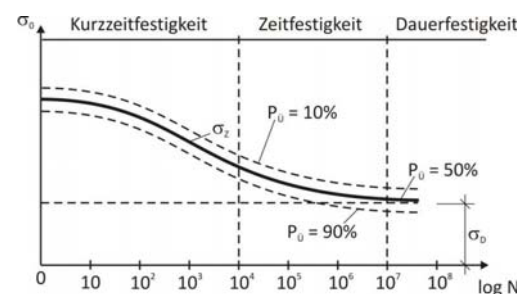
(wird auch zur Kerbfallklassifizierung benutzt)

$\Delta\sigma_D$  für  $N_D = 5 \cdot 10^6$  : **Dauerfestigkeit**

(Spannungsschwingbreite, oberhalb der ein Ermüdungsnachweis erforderlich wird)

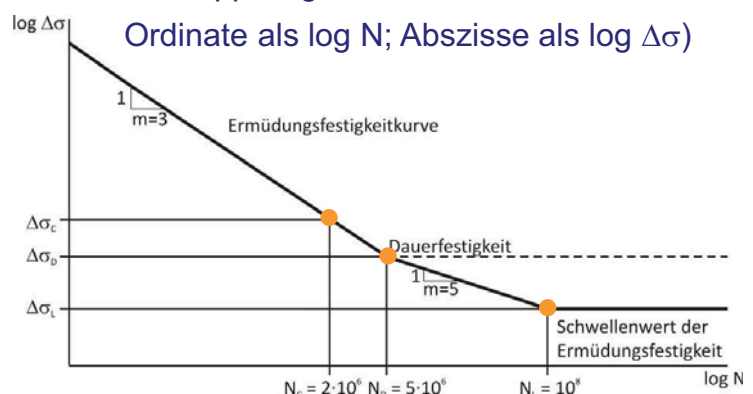
$\Delta\sigma_L$  für  $N_L = 1 \cdot 10^8$  : **Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit**

(Spannungsschwingbreite, unterhalb der die Spannungsschwingbreiten eines Lastkollektivs nicht mehr zum Ermüdungsschaden beitragen)



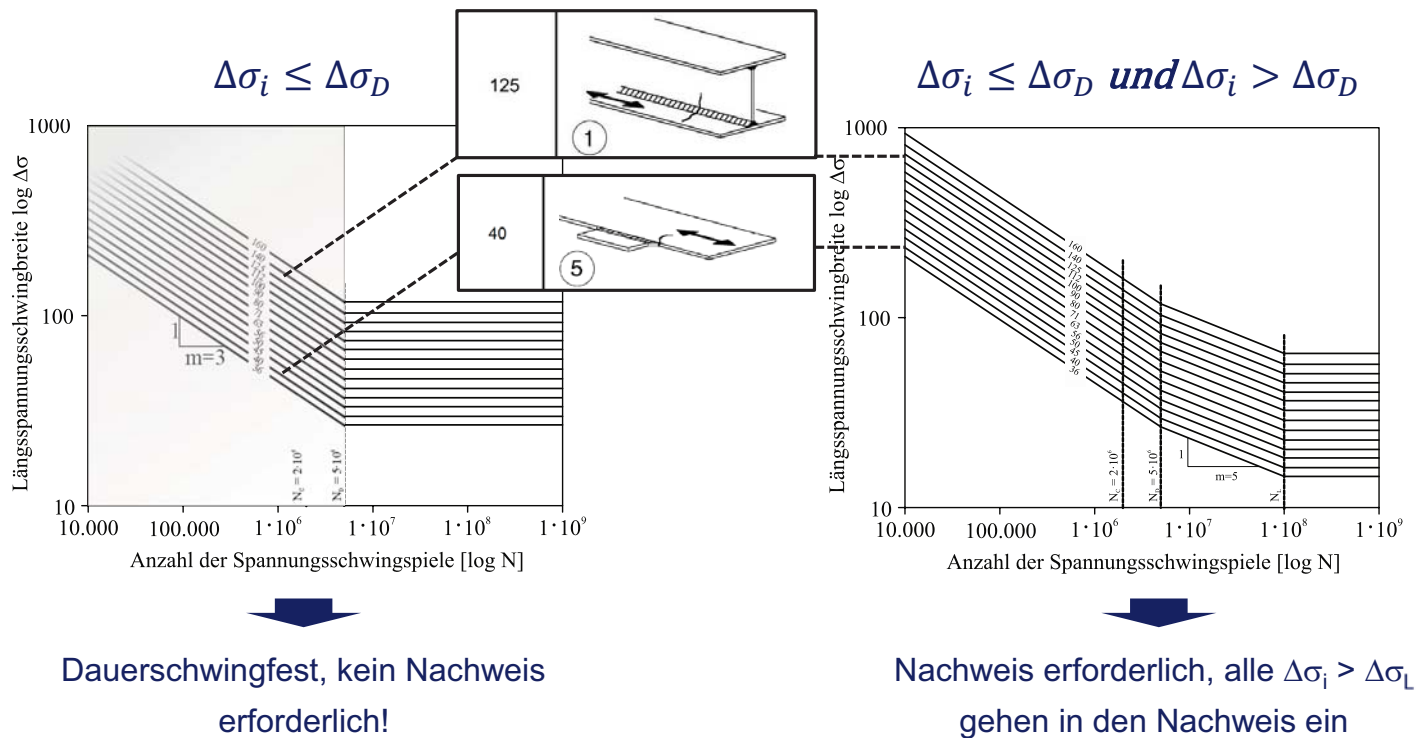
Darstellung der Wöhler-Linie im doppellogarithmischen Maßstab

Ordinate als  $\log N$ ; Abszisse als  $\log \Delta\sigma$



## Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

Wöhler-Linien für verschiedene Prüfkörper / Bauteile („Kerbdetails“)

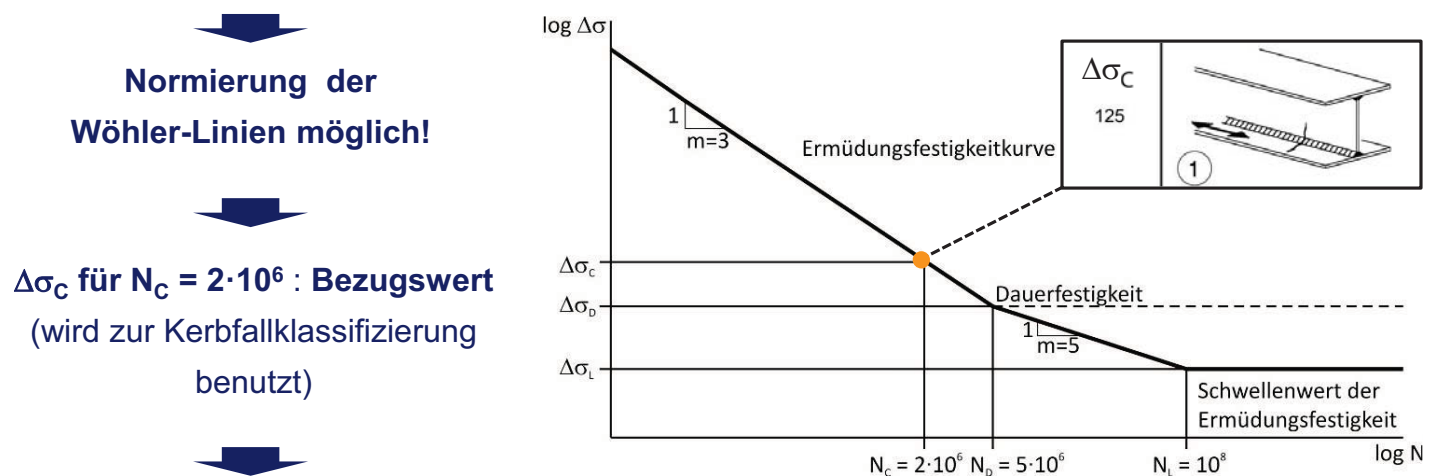


# Ermüdung: Wöhlerlinien

## Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

Darstellung der Wöhler-Linie im doppellogarithmischen Maßstab

Ordinate als  $\log N$ ; Abszisse als  $\log \Delta\sigma$



**Normierung der Wöhler-Linien möglich!**

$\Delta\sigma_c$  für  $N_c = 2 \cdot 10^6$  : **Bezugswert**  
(wird zur Kerbfallklassifizierung benutzt)

$\Delta\sigma_D$  für  $N_D = 5 \cdot 10^6$  : **Dauerfestigkeit**

$\Delta\sigma_L$  für  $N_L = 1 \cdot 10^8$  : **Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit**



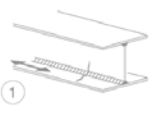
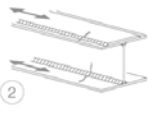

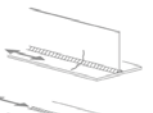


Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit wird bei  $N_c = 2 \cdot 10^6$  Lastwechseln festgelegt

⇒ Kerbfälle sind auf  $N_c$  Lastwechsel bezogen

⇒ Kerbfall gibt die Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_c$  eines Konstruktionsdetails an

Bestimmung des Kerbfalls mit Hilfe einer **Kerbfalltabelle** (DIN EN 1993-1-9)

EN 1993-1-9, (Tab. 8.1-8.10)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125	 	<p>Durchgehende Längsnähte:</p> <p>1) Mit Automaten beidseitig durchgeschweißte Nähte.</p> <p>2) Automaten geschweißte Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.</p>	<p>Kerbfälle 1) und 2):</p> <p>Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.</p>
112	 	<p>3) Automaten geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen.</p> <p>4) Mit Automaten einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.</p>	<p>4) Weist diesen Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerbgruppe 100 zuzuordnen.</p>
	 	<p>5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte.</p> <p>6) Von Hand oder mit Automaten einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.</p>	<p>5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Paugenauigkeit erforderlich. Dabei bei HV-Nähten das Stegblech anzuschärfen, dass die Wurzels ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.</p>

## Beschreibung

### Durchgehende Längsnähte:

- 1) Mit Automaten beidseitig durchgeschweißte Nähte.
- 2) Automaten geschweißte Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.

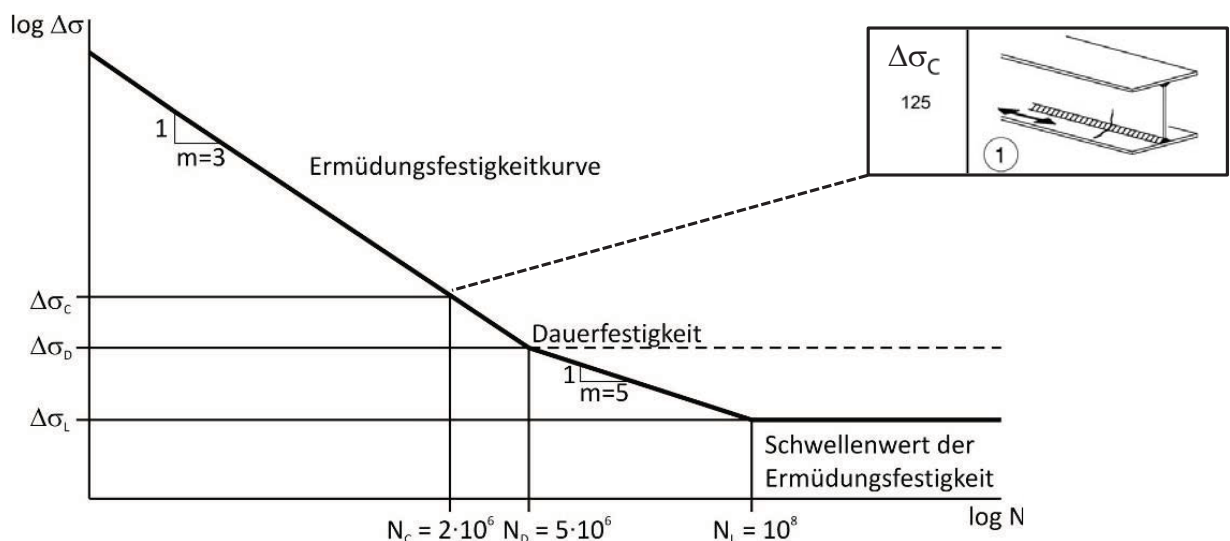
# Ermüdung: Wöhlerlinien

Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

Beispiel:

Wöhlerlinie ermittelt, d.h. bekannt für ein gegebenes Bauteil

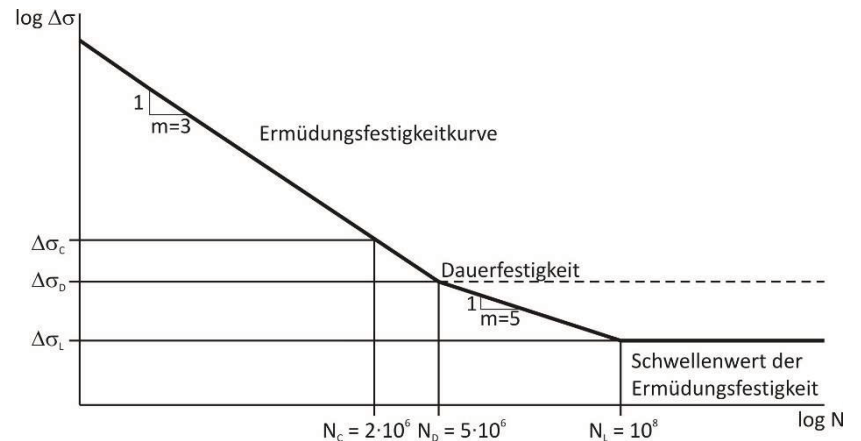
→ Anzahl der ertragbaren Lastwechsel kann nun für eine angegebene Spannungsschwingbreite ermittelt werden (log. Dreisatz)



## Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

### Beispiel:

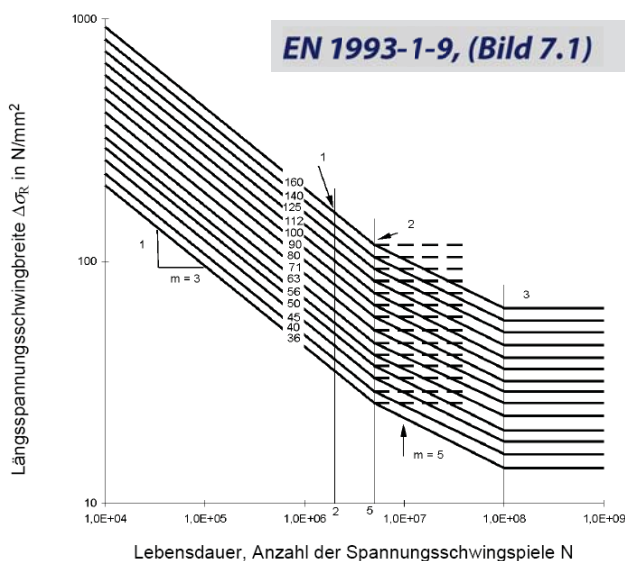
Achtung: linear im doppelt-logarithmischen Maßstab! Dreisatz wie folgt:



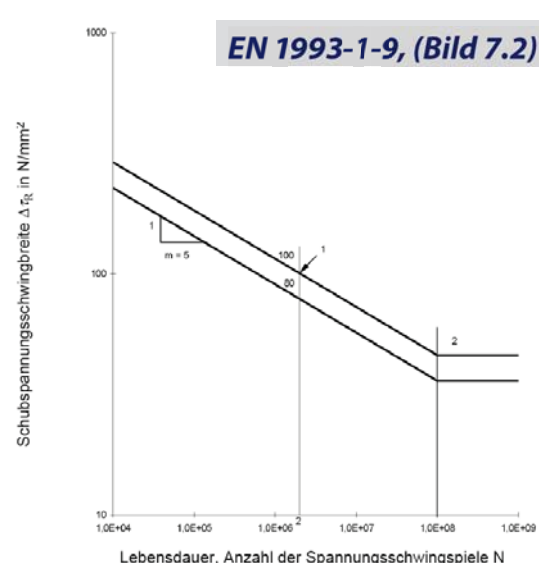
# Ermüdung: Wöhlerlinien

## Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

In DIN EN 1993-1-9 stellen die Geraden für jeden Kerbfall, der mit  $\Delta \sigma_C$  bezeichnet wird, die  $P_{\bar{u}} = 95\%$ -Fraktilewerte der Ermüdungsfestigkeit ausgewertet aus Ermüdungsversuchen mit konstanter Spannungsschwingbreite  $\Delta \sigma_i$  mit bauteilähnlichen Probekörpern dar.



Ermüdungsfestigkeitskurven nach DIN EN 1993-1-9:  
Längsspannungen



Ermüdungsfestigkeitskurven nach DIN EN 1993-1-9:  
Schubspannungen

Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

Beispiel: Kerbfallklasse 125

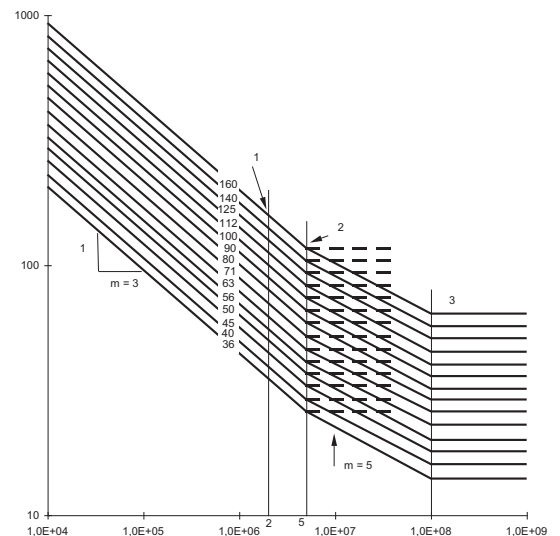
Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit:

Dauerfestigkeit:

**EN 1993-1-9, (Kap. 7.1 (2))**

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit:

**EN 1993-1-9, (Kap. 7.1 (3))**

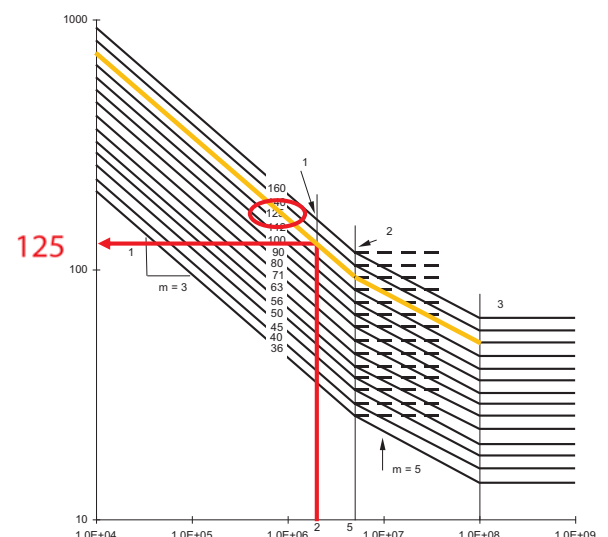


Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

Beispiel: Kerbfallklasse 125

$$\Delta\sigma_C = 125 \quad \Delta\sigma_D = 92,1 \quad \Delta\sigma_L = 50,6$$

Ertragbare Lastwechsel unter einer konstanten Schwingbreite  $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ :





### Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

#### Beispiel: Kerbfallklasse 125

$$\Delta\sigma_C = 125 \quad \Delta\sigma_D = 92,1 \quad \Delta\sigma_L = 50,6$$

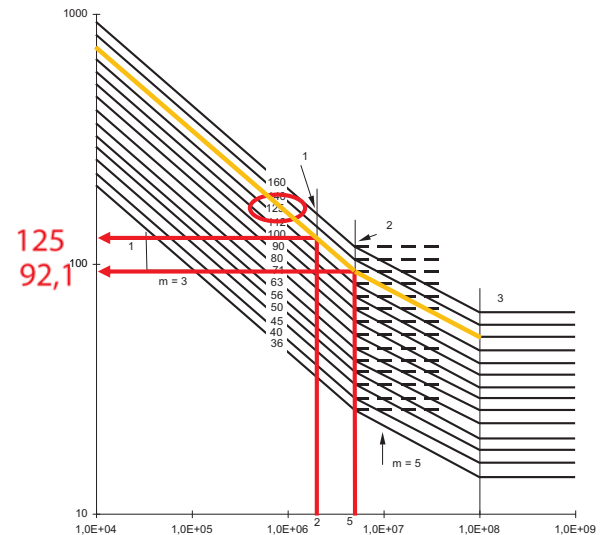
Ertragbare Lastwechsel unter einer konstanten Schwingbreite  $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ :

$$N = 3.906.250$$

Annahme: 1.000.000 LW werden aufgebracht.

Ermittlung der „Schadenssumme“ D:

Nach Palmgren-Miner lassen sich diese Schäden, hervorgerufen durch unterschiedliche Lastwechsel bei unterschiedlichen Schwingbreiten, addieren.

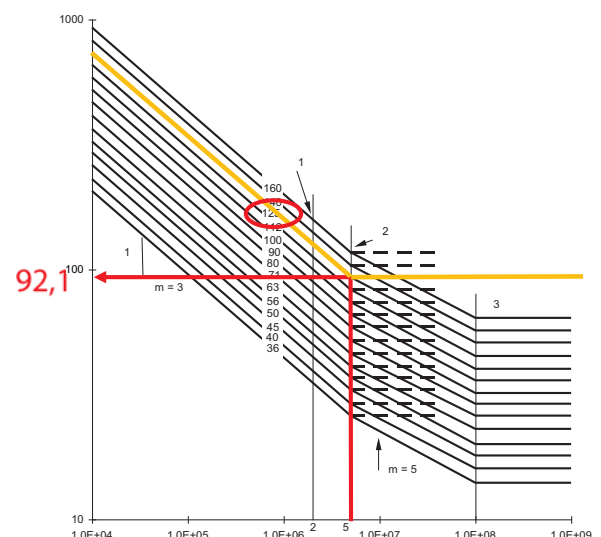


### Wöhler-Linie als Kurve aus den an gleichen Prüfkörpern ermittelten Bruchlastspielzahlen

#### Beispiel: Kerbfallklasse 125

$$\Delta\sigma_C = 125 \quad \Delta\sigma_D = 92,1 \quad \Delta\sigma_L = 50,6$$

Ertragbare Lastwechsel unter einer konstanten Schwingbreite  $\Delta\sigma = 90 \text{ N/mm}^2$ :



Ein Ermüdungsnachweis ist u.a. erforderlich bei

- Hebezeugen (z.B. Krane)
- rollenden Lasten (z.B. Kranbahnen, (Eisenbahn-) Brücken)
- vibrierenden Maschinen
- wind-induzierten Schwingungen (z.B. Schornsteine, Maste)



Quelle: Liebherr



Quelle: Hildenbrand Ingenieure



Quelle: Schicks  
Abgastechnik



Quelle: wikipedia



Quelle: VG Linz



Quelle: SSF Ingenieure



## Allgemeines:

Auf einen Ermüdungsnachweis (nur Normalspannungen) kann verzichtet werden, falls gilt:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{max} \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}$$

Lastwechsel unterhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit fließen nicht in den Nachweis ein, d.h. sie sind nicht schadensrelevant:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \leq \frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}} \quad \gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_i \leq \frac{\Delta\tau_L}{\gamma_{Mf}}$$

Allgemeines, Teilsicherheitsbeiwert Einwirkungsseite, z.B.:

$$\gamma_{Ff} = 1,0$$

z.B. EN 1993-6, (Kap. 9.2(1))

z.B. DIN FB 103, (Kap. 9.3(1))



Quelle: Liebherr



Quelle: Hildenbrand Ingenieure



Quelle: SSF Ingenieure

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

Allgemeines, Teilsicherheitsbeiwert Widerstandsseite nach EN 1993-1-9:

### Konzept der Schadenstoleranz

- Erkennung und Beseitigung von Schäden durch planmäßige Inspektionen und Wartung während der Nutzungsdauer
- Lastumlagerungen müssen möglich sein
- Inspektionsprogramm gemäß NA

### Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung

- Ausreichende Sicherheit gegen Ermüdung ohne planmäßige Inspektionen
- Vermeidung von unangekündigtem Versagen des Bauteils oder des Gesamttragwerks



Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{Mf}$  für die Ermüdungsfestigkeit (Widerstandsseite)

	Schadensfolgen	
Bemessungskonzept	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen	1,15	1,35

EN 1993-1-9, (Tab.3.1)

## Allgemeines, Begrenzung der Spannungsschwingbreiten:

Die Spannungsschwingbreiten für Nennspannungen, korrigierte Nennspannungen oder Strukturspannungen (Kerbspannungen) infolge der häufig auftretenden Lasten  $\psi_1 Q_k$ , siehe EN 1990, sind in der Regel zu begrenzen durch:

$$\Delta\sigma \leq 1,5 \cdot f_y$$

$$\Delta\tau \leq 1,5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

EN 1993-1-9, (Gl.8.1)

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

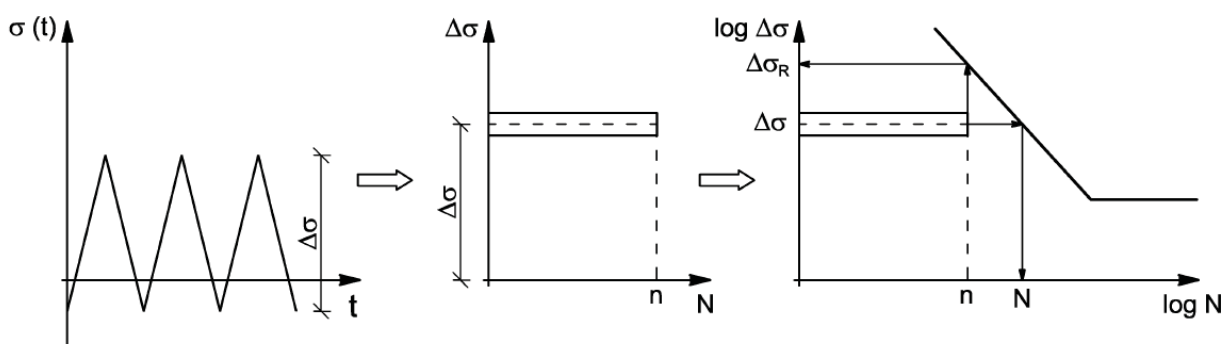
## Nachweis bei konstanten Spannungsschwingbreiten:

Bei periodischer Beanspruchung in Form eines Einstufenkollektivs (konstante Spannungsschwingbreite) kann der Ermüdungsnachweis wie folgt geführt werden:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau \leq \frac{\Delta\tau_R}{\gamma_{Mf}}$$

mit  $\Delta\sigma_R$  = Ermüdungsfestigkeit des maßgebenden Kerbfalls, für die Anzahl der Spannungsspiele während der erforderlichen Nutzungsdauer






## Nachweis bei konstanten Spannungsschwingbreiten:

### Beispiel:

Kerbfall 125

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125		<p><u>Durchgehende Längsnähte:</u></p> <p>1) Mit Automaten beidseitig durchgeschweißte Nähte.</p> <p>2) Automatengeschweißte Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.</p>	<p><u>Kerbfälle 1) und 2):</u></p> <p>Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.</p>

periodischer Beanspruchung in Form eines Einstufenkollektivs,  $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$

100 LW / Tag, Nutzungsdauer: 100 Jahre

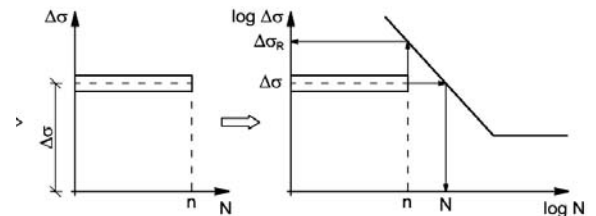
$$\gamma_{Mf} = \gamma_{Ff} = 1,0$$

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Nachweis bei konstanten Spannungsschwingbreiten:

### Beispiel:

Lastwechsel während der Lebensdauer:

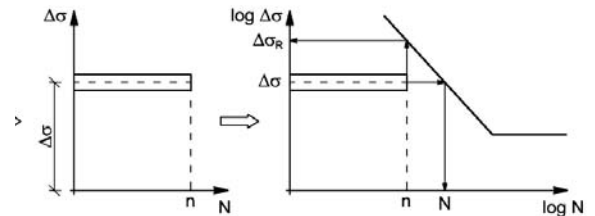


Ermüdungsfestigkeit des maßgebenden Kerbfalls, für die Anzahl der Spannungsspiele während der erforderlichen Nutzungsdauer (d.h. erforderliche Ermüdungsfestigkeit, um die geforderten Lastwechsel aufnehmen zu können):

## Nachweis bei konstanten Spannungsschwingbreiten:

### Beispiel:

Lastwechsel während der Lebensdauer:



$$n = 100 \left[ \frac{LW}{Tag} \right] \cdot 365 \left[ \frac{Tage}{Jahr} \right] \cdot 100 [Jahre] = 3.650.000 [LW]$$

Alternativ: wie viele Lastwechsel N können aufgenommen werden?

$$N_2 = N_1 \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} \right)^m$$

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten:

Bei einem unregelmäßigen nicht periodischen Spannungsspektrum (variable Spannungsschwingbreiten) ist der Nachweis entweder

- mittels einer **Schadensakkumulation**  
(Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner)

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

EN 1993-1-9, (Gl. A.1)

EN 1993-1-9, (Gl. A.2)

- oder mittels **schadensäquivalenter Spannungsschwingbreiten** durch Vergleich der einwirkenden schadensäquivalenten konstante Spannungsschwingbreite bezogen auf  $2 \times 10^6$  Schwingspiele

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-9, (Gl. 8.2)

## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten, Schadensakkumulation:

Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner:

- jede Spannung  $\Delta\sigma_i$ , die  $n_i$ -mal auftritt, hat einen Schädigungsanteil  $n_i/N_i$  am Bruchversagen ( $N_i$  = Bruchlastspielzahl zu der Spannung  $\Delta\sigma_i$ , d.h.  $N_i$  ist die Anzahl an Lastwechseln, die das Bauteil bei einer Spannungsamplitude  $\Delta\sigma_i$  erträgt)
- die Summe der Teilschädigungsquotienten darf den Wert 1 nicht überschreiten

EN 1993-1-9, (Kap. A.5)

EN 1993-1-9, (Kap. A.6)

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

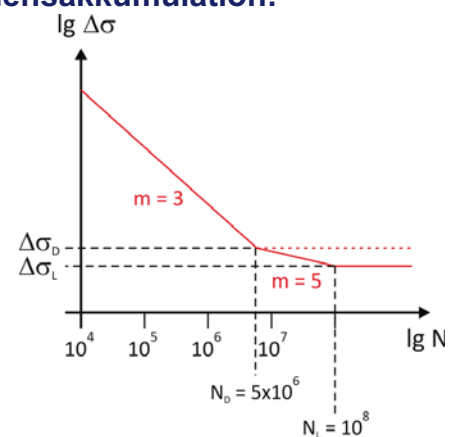
## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten, Schadensakkumulation:

Ermittlung der Bruchlastspielzahlen:

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots \leq 1$$

$$N_2 = N_1 \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} \right)^m$$

Normalspannungen:

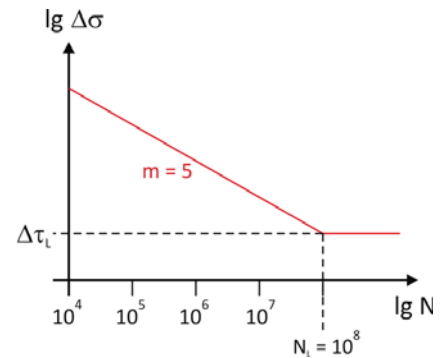


## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten, Schadensakkumulation:

Ermittlung der Bruchlastspielzahlen:

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots \leq 1$$

$$N_2 = N_1 \cdot \left( \frac{\Delta \tau_1}{\Delta \tau_2} \right)^m$$

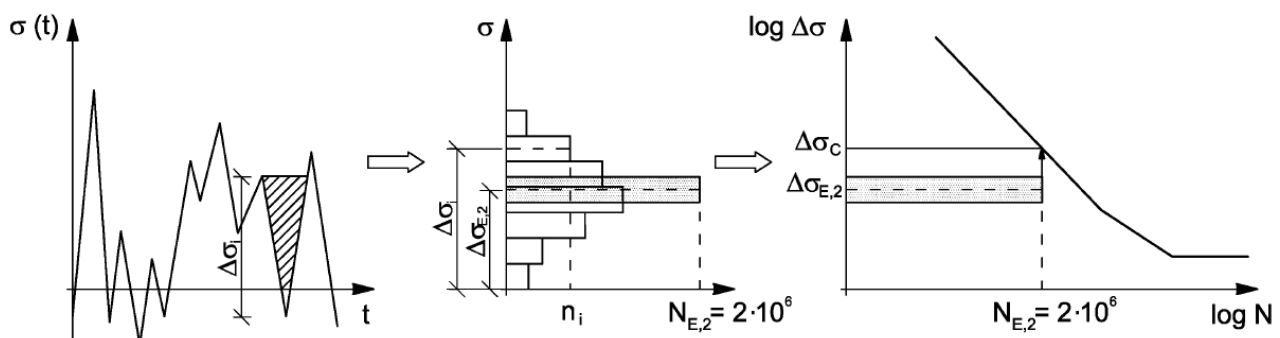


## Schubspannungen:

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten, schadensäqu. Spannungsschwingb.:

- Ermittlung des Bezugswerts der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta \sigma_c$  (Kerbfall)
- Bestimmung der schadensäquivalenten konstanten Spannungsschwingbreite  $\Delta \sigma_{E,2}$  (= Spannungsschwingbreite, die bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen die gleiche Schädigung bewirkt)
- Vergleich der einwirkenden schadensäquivalenten konstanten Spannungsschwingbreite mit dem Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit





## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten, schadensäqu. Spannungsschwingb.:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}$$

schadensäquivalente Spannungsschwingbreite:

$$D = \sum_j \frac{n_j}{N_j} + \sum_k \frac{n_k}{N_k} \quad N_j = 5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_j} \right)^3 \quad N_k = 5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_k} \right)^5$$

$$D = \frac{\sum_j (n_j \cdot \Delta\sigma_j^3)}{5 \cdot 10^6 \cdot \Delta\sigma_D^3} + \frac{\sum_k (n_k \cdot \Delta\sigma_k^5)}{5 \cdot 10^6 \cdot \Delta\sigma_D^5}$$

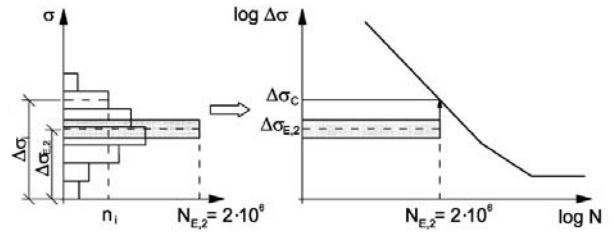
Schaden, hervorgerufen durch variable Schwingspiele

!

$$\frac{N_C \cdot \Delta\sigma_{E,2}^3}{5 \cdot 10^6 \cdot \Delta\sigma_D^3}$$

Schaden, hervorgerufen durch konstantes  
Schwingspiel  $\Delta\sigma_{E,2}$  bei 2.000.000 LW

$$\Rightarrow \Delta\sigma_{E,2} = \left( \frac{\sum_j (n_j \cdot \Delta\sigma_j^3) + \Delta\sigma_D^{-2} \cdot (\sum_k (n_k \cdot \Delta\sigma_k^5))}{N_C} \right)^{\frac{1}{3}}$$



# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Nachweis bei variablen Spannungsschwingbreiten, schadensäqu. Spannungsschwingb.:

Ermittlung von  $\Delta\sigma_{E,2}$  für Stahlbrücken nach DIN FB 103:

DIN-Fachbericht 103:2009-03

II-9

Werkstoffermüdung

Stahlbrücken (2009)

### 9.4 Ermüdungswirksame Spannungsschwingbreite

#### 9.4.1 Nennspannungen

(1) Falls nicht durch die zuständige Behörde anders bestimmt, ist die Bemessungsschwingbreite der Nennspannungen für die vereinfachten Nachweise nach II-9.2.2 und II-9.2.3 nach dem hier angegebenen Verfahren zu bestimmen.

(2) Die größte Spannung  $\sigma_{P,max}$  und die kleinste Spannung  $\sigma_{P,min}$  sind durch die Auswertung der Einflusslinie zu bestimmen.

(3) Die zugehörige Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_P$  für die Ermittlung der Schädigung wird wie folgt bestimmt:

$$\Delta\sigma_P = |\sigma_{P,max} - \sigma_{P,min}|$$

(4) Die Schädigung der Spannungsschwingbreite kann auf den Grenzwert der Ermüdungsfestigkeit, der bei  $2 \times 10^6$  Lastwechseln liegt, bezogen werden:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \phi \cdot \Delta\sigma_P$$

wobei:

$\lambda$  ein Anpassungsbeiwert nach Abschnitt II-9.5 ist;

$\phi$  ein Anpassungsbeiwert für die Einwirkungsseite ist.

(5) Für Eisenbahnbrücken wird  $\phi$  nach DIN-Fachbericht 101 „Einwirkungen auf Brücken“ bestimmt. Für Straßenbrücken wird  $\phi$  mit 1,0 angesetzt.

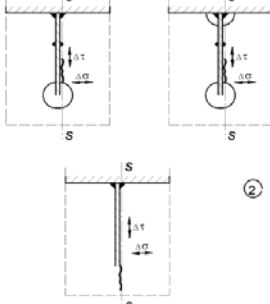
(6) Als eine Alternative zu dem hier angegebenen Verfahren können die Ermüdungsschwingbreiten durch Auswertung der Spannungszeitverläufe der Ermüdungslastmodelle nach DIN-Fachbericht 101 „Einwirkungen auf Brücken“ unter der Voraussetzung, dass die zuständige Behörde zugestimmt hat, bestimmt werden.

## Nachweis bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungsschwingbreiten:

• Allgemein: 
$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad \text{bzw.} \quad D_{d,\sigma} + D_{d,\tau} \leq 1,0$$

EN 1993-1-9, (Gl. 8.3)

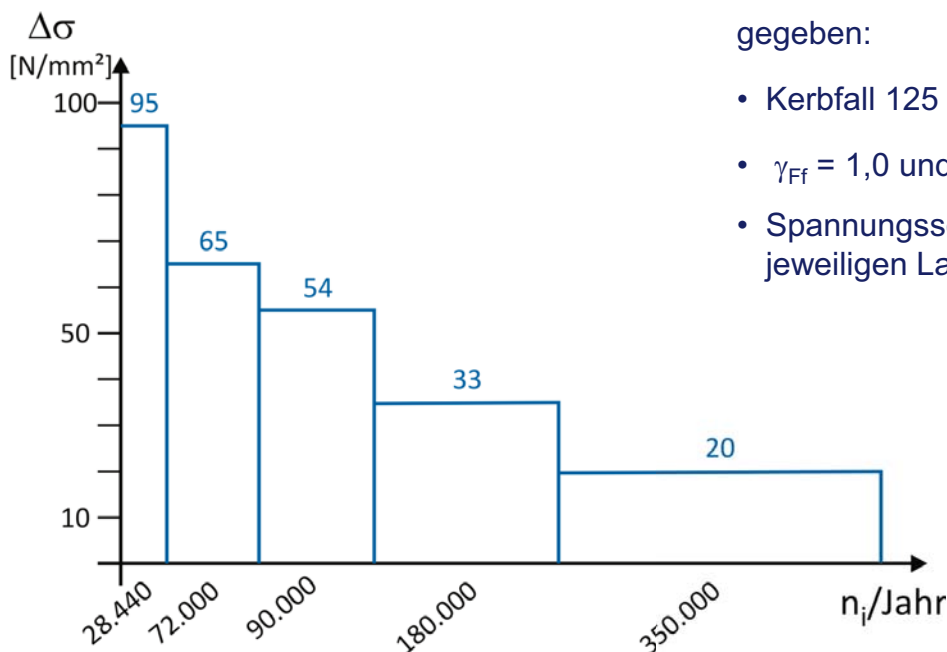
- Oder: Spezielles Nachweisformat wie z.B. in den Kerbfalltabellen gemäß DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.9 angegeben.

56		<p>2) Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Quertträger.</p> $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_x}{W_{x,net,s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_x}{A_{w,net,s}}$ <p>Spannungsschwingbreite zwischen den Längsrippen sind ebenfalls entsprechend EN 1993-2 nachzuweisen.</p>	<p>2) Der Nachweis ist mit der Kombination der Spannungsschwingbreite <math>\Delta\tau</math> infolge Querkraft und der Spannungsschwingbreite infolge Biegung <math>\Delta\sigma</math> im Quertägersteg mit einer äquivalenten Spannungsschwingbreite zu führen:</p> $\Delta\sigma_{eq} = \frac{1}{2} (\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2})$
----	---	---	---

Auszug aus Tabelle 8.9 gemäß DIN EN 1993-1-9

## Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

### Aufgabe 1:



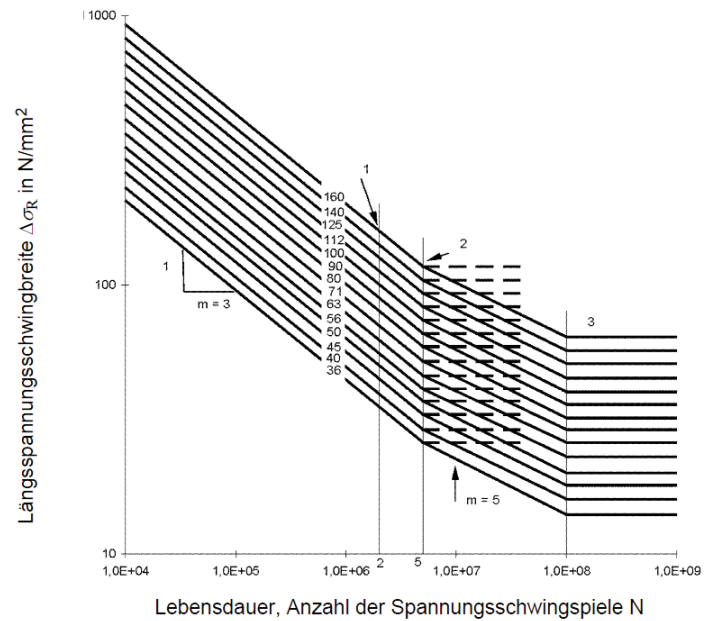
gegeben:

- Kerbfall 125
- $\gamma_{Ff} = 1,0$  und  $\gamma_{Mf} = 1,0$
- Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma_i$  mit der jeweiligen Lastspielzahl  $n_i$  pro Jahr

- gesucht:
- a) Dauerfestigkeit  $\Delta\sigma_D$ , Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_L$
  - b) Schädigung nach Palmgren-Miner je Betriebsjahr und erreichbare Lebensdauer

## Aufgabe 1:

a) Ermittlung von  $\Delta\sigma_D$  und  $\Delta\sigma_L$

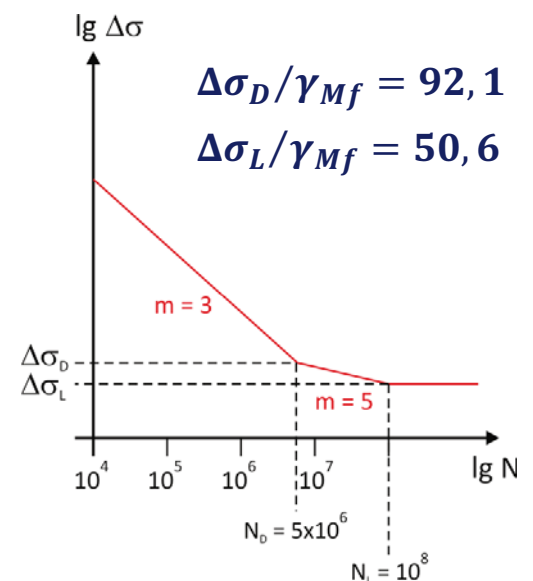


# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Aufgabe 1:

b) Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner

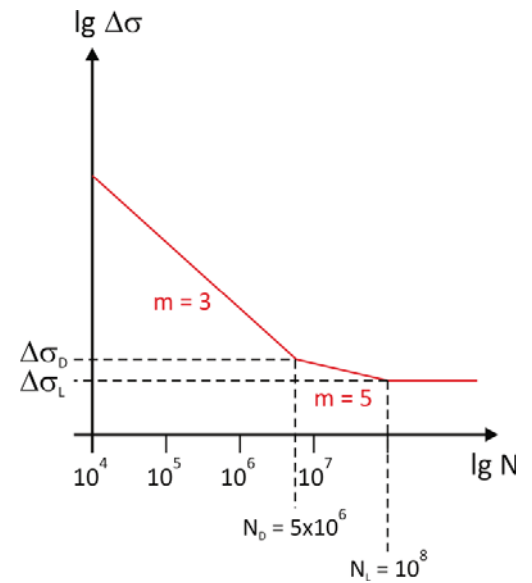
Vergleich der Spannungsschwingbreiten des Lastkollektivs mit Dauer- u. Ermüdungsfestigkeit:



## Aufgabe 1:

- b) Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner  
Berechnung der zugehörigen Bruchlastspielzahlen  $N_i$ :

$$N_i = N_D \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^m$$



## Aufgabe 1:

- b) Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner  
Schädigung aufgrund des Lastkollektivs je Betriebsjahr:

Erreichbare Lebensdauer:



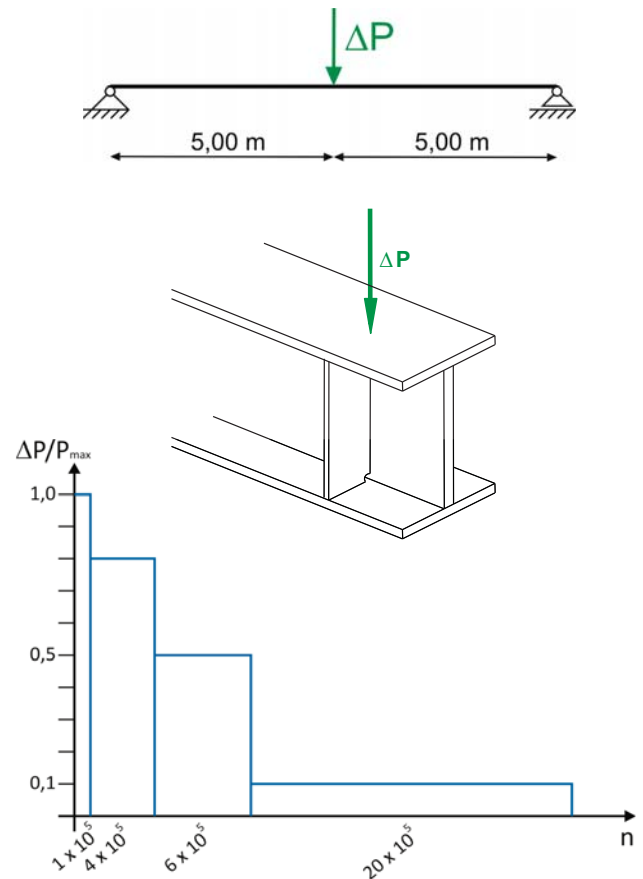
## Aufgabe 2:

### gegeben:

- Querschnitt: HEB 400
- Sicherheitsbeiwerte:  $\gamma_{Ff} = 1,0$  und  $\gamma_{Mf} = 1,0$
- Last:  $P_{max} = 170 \text{ kN}$
- Beulsteife ( $t < 12 \text{ mm}$ ) in Feldmitte im Querschnitt unter der einwirkenden Belastung  
 $\Rightarrow$  maßgebender Kerbfall:  $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$  (Kerbfall 80)
- Lastkollektiv für die Nutzungsdauer

### gesucht:

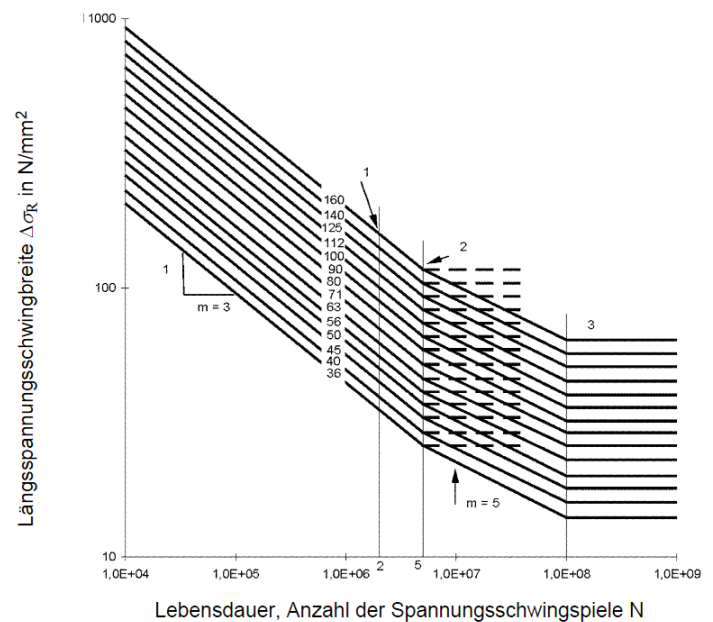
- Ermüdungsnachweis mit der Methode der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite
- Ermüdungsnachweis mit Hilfe der Palmgren-Miner-Regel



# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Aufgabe 2:

- Ermüdungsnachweis mit der Methode der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite, Spannungsschwingbreiten und Spannungskollektiv:

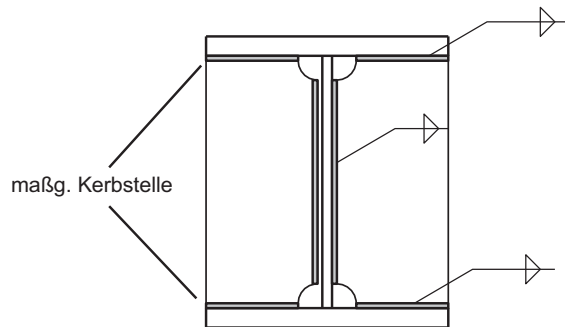


## Aufgabe 2:

a) Ermüdungsnachweis mit der Methode der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite, Spannungsschwingbreiten und Spannungskollektiv:

Querschnittswerte:

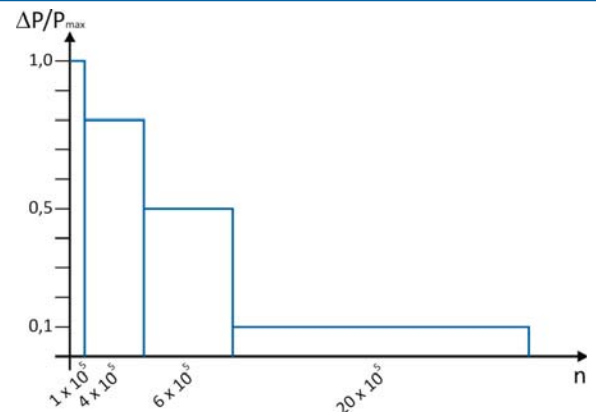
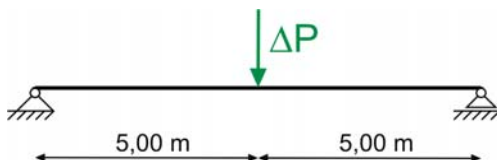
Widerstandsmoment in Höhe der Kerbstelle:



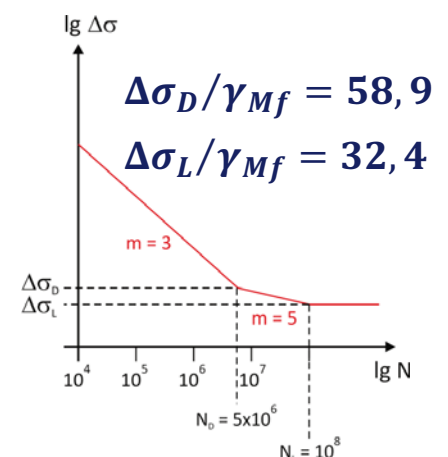
Nennhöhe →		400			
Profilreihe →		HEAA	HEA	HEB	HEM
$h$	mm	378	390	400	432
$b$	mm	300	300	300	307
$t_w$	mm	9,5	11	13,5	21
$t_f$	mm	13	19	24	40
$r$	mm	27	27	27	27
$d$	mm	298	298	298	298
$A$	cm <sup>2</sup>	118	159	198	326
$U$	m <sup>2</sup> /m	1,89	1,91	1,93	2,00
$g_k$	kN/m	0,924	1,248	1,553	2,557
$a$	-	0,3373	0,2829	0,2719	0,2461
$d/t_w$	-	31,4	27,1	22,1	14,2
$c/t_f$	-	11,5	7,9	6,3	3,8
$I_y$	cm <sup>4</sup>	31250	45070	57680	104100

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Aufgabe 2:



$n_i$	$\Delta P$	$\Delta \sigma_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$m$
$1 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot P_{\max}$		
$4 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot P_{\max}$		
$6 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot P_{\max}$		
$20 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot P_{\max}$		



**Aufgabe 2:**

- a) Ermüdungsnachweis mit der Methode der schadens-  
äquivalenten Spannungsschwingbreite, Nachweis:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}$$

$n_i$	$\Delta\sigma_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	m
$1 \cdot 10^5$	$129,7 > \Delta\sigma_D$	3
$4 \cdot 10^5$	$103,8 > \Delta\sigma_D$	3
$6 \cdot 10^5$	$64,9 > \Delta\sigma_D$	3

$$\Delta\sigma_{E,2} = \left( \frac{\sum_j (n_j \cdot \Delta\sigma_j^3) + \Delta\sigma_D^{-2} \cdot (\sum_k (n_k \cdot \Delta\sigma_k^5))}{N_C} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \rightarrow \Delta\sigma_i = \Delta\sigma_j$
$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \rightarrow \Delta\sigma_i = \Delta\sigma_k$
$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} \rightarrow -$

**Aufgabe 2:**

- b) Ermüdungsnachweis mit Hilfe der Palmgren-Miner-Regel

$$N_i = N_D \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^m$$

$n_i$	$\Delta\sigma_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	m
$1 \cdot 10^5$	$129,7 > \Delta\sigma_D$	3
$4 \cdot 10^5$	$103,8 > \Delta\sigma_D$	3
$6 \cdot 10^5$	$64,9 > \Delta\sigma_D$	3

## Zusammenfassung:

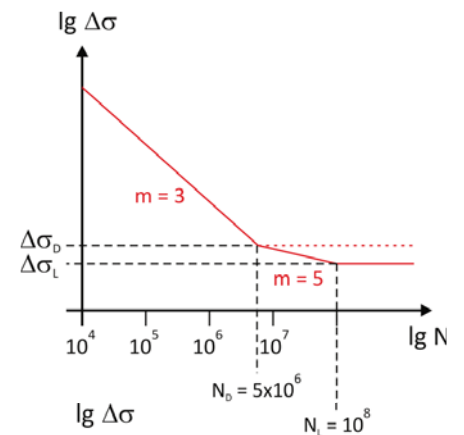
### Ermittlung / Bestimmung der Wöhler-Linie, Normalspannungen:

Kerbdetail →  $\Delta\sigma_C$

$$\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_C \cdot \sqrt[3]{\frac{N_C}{N_D}} = \Delta\sigma_C \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}}$$

EN 1993-1-9,  
(Kap. 7.1 (2)  
bzw. (3))

$$\Delta\sigma_L = \Delta\sigma_D \cdot \sqrt[5]{\frac{N_D}{N_L}} = \Delta\sigma_D \cdot \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}}$$

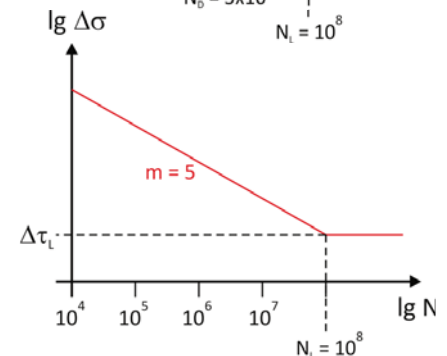


### Ermittlung / Bestimmung der Wöhler-Linie, Schubspannungen:

Kerbdetail →  $\Delta\tau_C$

$$\Delta\tau_L = \Delta\tau_C \cdot \sqrt[5]{\frac{N_C}{N_L}} = \Delta\tau_C \cdot \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}}$$

EN 1993-1-9,  
(Kap. 7.1 (2))



# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Zusammenfassung:

### Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

EN 1993-1-9,  
(Kap. A.5/A.6)

### **Normalspannungen:**

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \quad \Rightarrow \quad N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right)^3$$

$$\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \geq \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} \quad \Rightarrow \quad N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right)^5$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \leq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} \quad \Rightarrow \quad N_i = \infty$$

### **Schubspannungen:**

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_i \geq \Delta\tau_L / \gamma_{Mf} \quad \Rightarrow \quad N_i = 1 \cdot 10^8 \cdot \left( \frac{\Delta\tau_L / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_i} \right)^5$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_i \leq \Delta\tau_L / \gamma_{Mf} \quad \Rightarrow \quad N_i = \infty$$



## Zusammenfassung:

schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-9, (Gl. 8.2)

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0$$

EN 1993-1-9, (Gl. 8.3)

**Normalspannungen:**

$$\Delta\sigma_{E,2} = \left( \frac{\sum_j (n_j \cdot \Delta\sigma_j^3) + \Delta\sigma_D^{-2} \cdot (\sum_k (n_k \cdot \Delta\sigma_k^5))}{N_C} \right)^{\frac{1}{3}}$$

mit:

$$\begin{aligned} \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i &\geq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} &\rightarrow \Delta\sigma_i &= \Delta\sigma_j \\ \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i &< \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} &\rightarrow \Delta\sigma_i &= \Delta\sigma_k \\ \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i &< \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} &\rightarrow &- \end{aligned}$$

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Zusammenfassung:

Begrenzung der Spannungsschwingbreiten:

Die Spannungsschwingbreiten für Nennspannungen, korrigierte Nennspannungen oder Strukturspannungen (Kerbspannungen) infolge der häufig auftretenden Lasten  $\psi_1 Q_k$ , siehe EN 1990, sind in der Regel zu begrenzen durch:

$$\Delta\sigma \leq 1,5 \cdot f_y$$

$$\Delta\tau \leq 1,5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

EN 1993-1-9, (Gl.8.1)

## Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten:



Quelle: DYNATEC GmbH

**Ermüdungsfestigkeit**

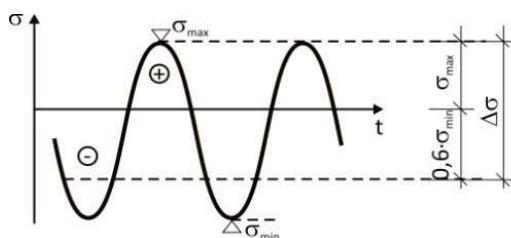
größtenteils in normierten Wöhlerlinien berücksichtigt

80	$L \leq 50 \text{ mm}$	
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$	
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$	
56	$L > 100 \text{ mm}$	

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

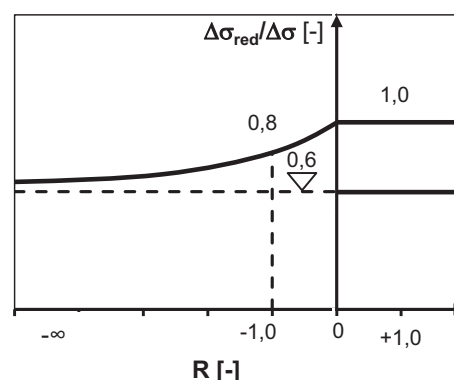
## Modifikation der Ermüdungsfestigkeit: Mittelspannungseinfluss

Bei nicht geschweißten Konstruktionen oder bei geschweißten Konstruktionen, die spannungsarm gegläht werden, darf der Mittelspannungseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit dadurch berücksichtigt werden, dass die Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{E,2}$  im Ermüdungsnachweis reduziert wird, wenn sie ganz oder teilweise im Druckbereich liegt.



EN 1993-1-9, (Kap. 7.2.1)

$$\Delta\sigma = |\sigma_{max}| + 0,6|\sigma_{min}|$$




## Modifikation der Ermüdungsfestigkeit: Größenabhängigkeit

Die Größenabhängigkeit ist entsprechend den Angaben in den Kerbfalltabellen (EN 1993-1-9, Tabelle 8.1 bis Tabelle 8.10) zu berücksichtigen.

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \cdot \Delta\sigma_C$$

EN 1993-1-9, (Kap. 7.2.2)

Beispiel:

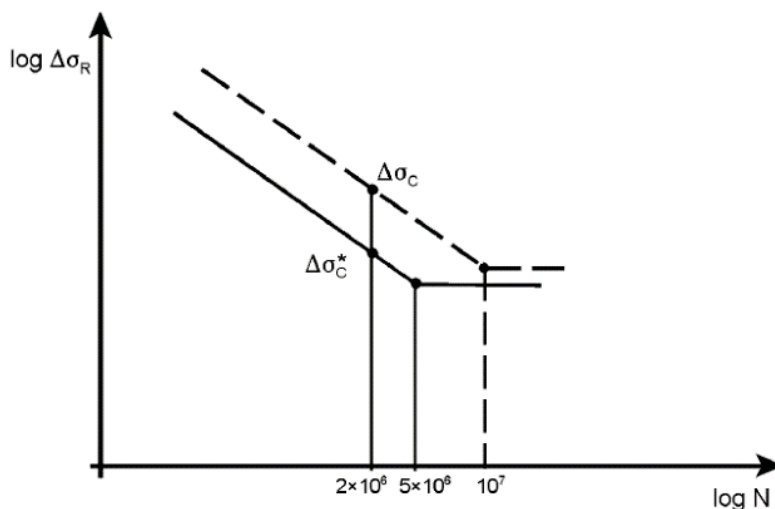
71	<p>Blechdickenabhängigkeit für <math>t &gt; 25</math> mm und/oder Berücksichtigung der Exzentrizität:</p> $k_s = \left( \frac{25}{t_1} \right)^{0,2} \left/ \left( 1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1,5}}{t_1^{1,5} + t_2^{1,5}} \right) \right.$  <p><math>t_2 \geq t_1</math></p>
----	---

# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

## Modifikation der Ermüdungsfestigkeit: Weitere

Die Kerbfallkategorien, die mit einem \* gekennzeichnet sind, dürfen um eine Kategorie angehoben werden, wenn die Wöhlerlinie (S-N-Kurve) mit  $m=3$  bis zur Dauerfestigkeit  $\Delta\sigma_C^*$  bei  $N_D^* = 10^7$  verlängert wird.

EN 1993-1-9, (Kap. 7.1, Anm. 1)



$$N_C = 2 \cdot 10^6$$

$$N_D = 5 \cdot 10^6$$

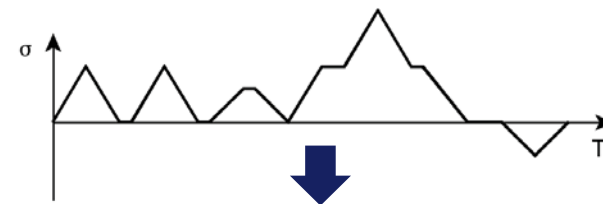
$$N_L = 1 \cdot 10^8$$

$$\Rightarrow N_D^* = 1 \cdot 10^7$$

↓  
Kerbfall  $\Delta\sigma_C^*$  darf um eine Kategorie angehoben werden

## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten

Spannungsverlauf am Konstruktionsdetail:

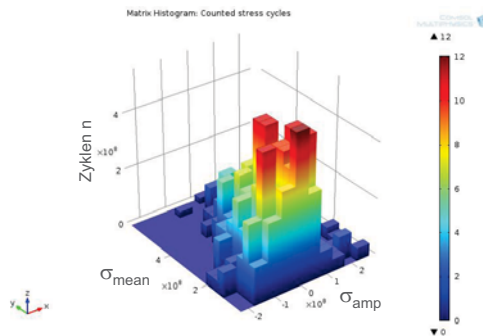


Spektrum der Spannungsschwingbreiten

EN 1993-1-9, (A.3)

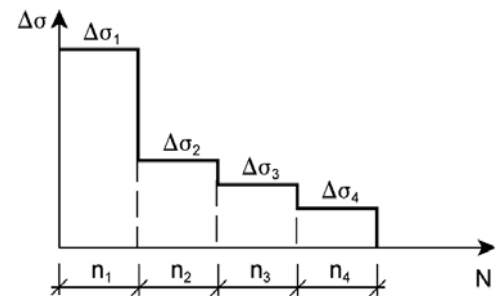
Zählverfahren:

- Rainflow-Methode  
(mit Erfassung der Mittelspannung)



Zählverfahren:

- Reservoir-Methode  
(ohne Erfassung der Mittelspannung)

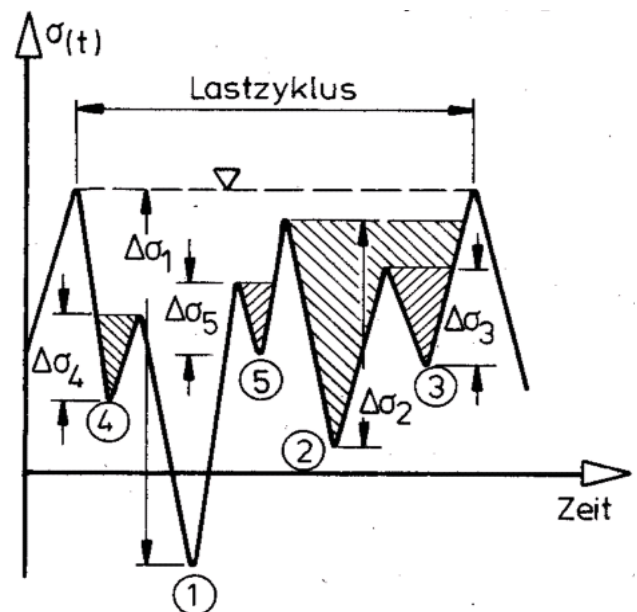


# Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9, Reservoir-Methode

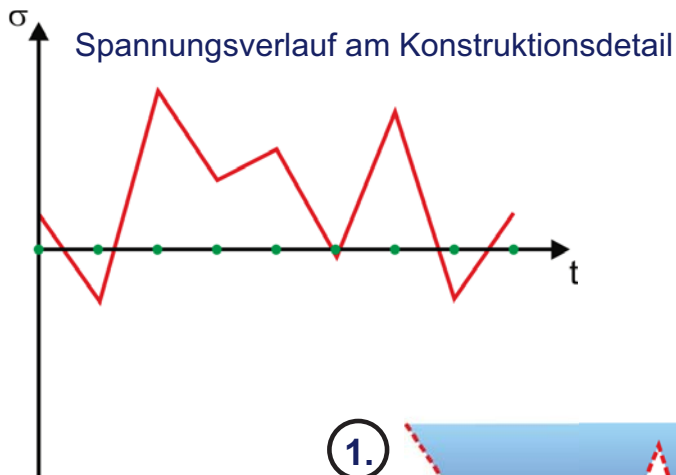
## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten

Vorgehen „Reservoir-Methode“:

- Spannungs-Zeit-Verlauf eines Lastzyklus „mit Wasser füllen“
- Ermittlung der Spannungsdifferenzen durch sukzessives Entleeren der gefüllten Bereiche
- $\Delta\sigma_1$  = Differenz zwischen dem Wasserspiegel und dem tiefsten Punkt (am tiefsten Punkt wird das Wasser abgelassen)
- Beanspruchungskollektiv: Ordnung der Spannungsdifferenzen nach Größen und Zusammenfassung in Stufen



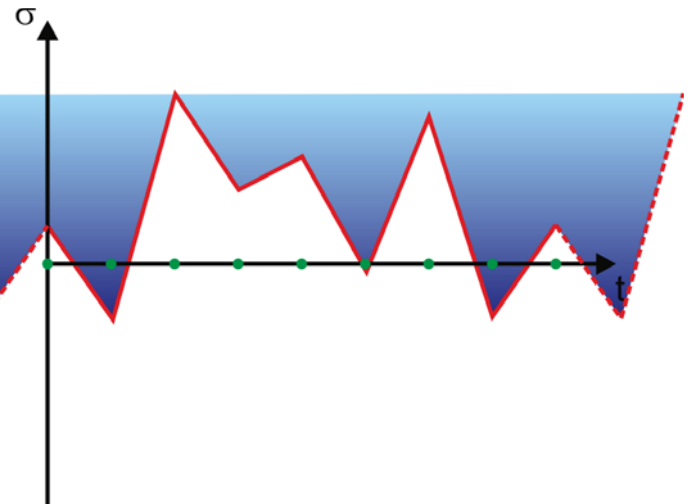
## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten



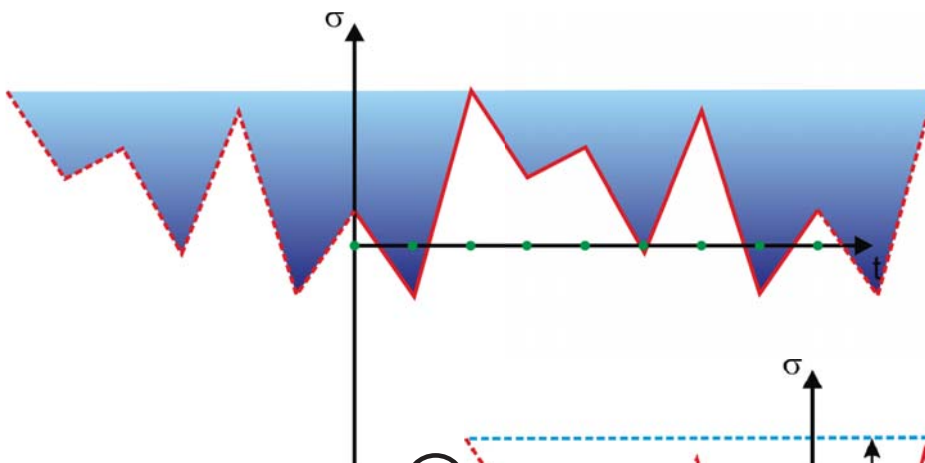
Bei dem dargestellten Spannungsverlauf handelt es sich um einen Spannungs-Zeitverlauf für ein Ereignis (z.B. eine Überfahrt). Dieses Ereignis wiederholt sich mehrfach, d.h. die Spannungs-Zeitverläufe werden mehrfach „aneinander gehängt“.

1.

1. Die aneinander gehängten Verläufe werden mit Wasser gefüllt; betrachtet wird jedoch nur ein einzelnes Ereignis (d.h. der Bereich mit durchgezogener Linie). Die angehängten Bereiche dienen lediglich dazu, dass das Wasser nicht „überläuft“.

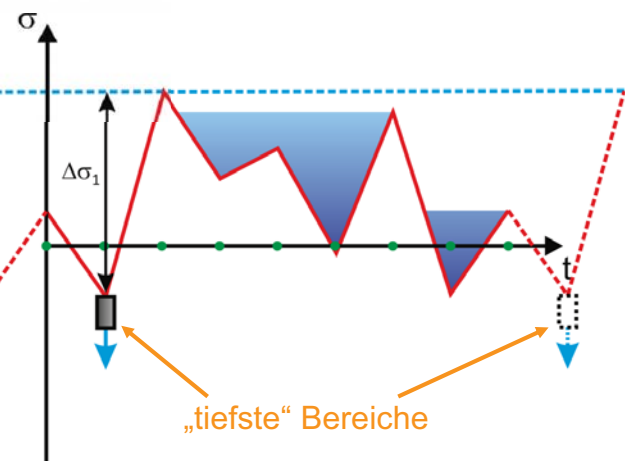


## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten



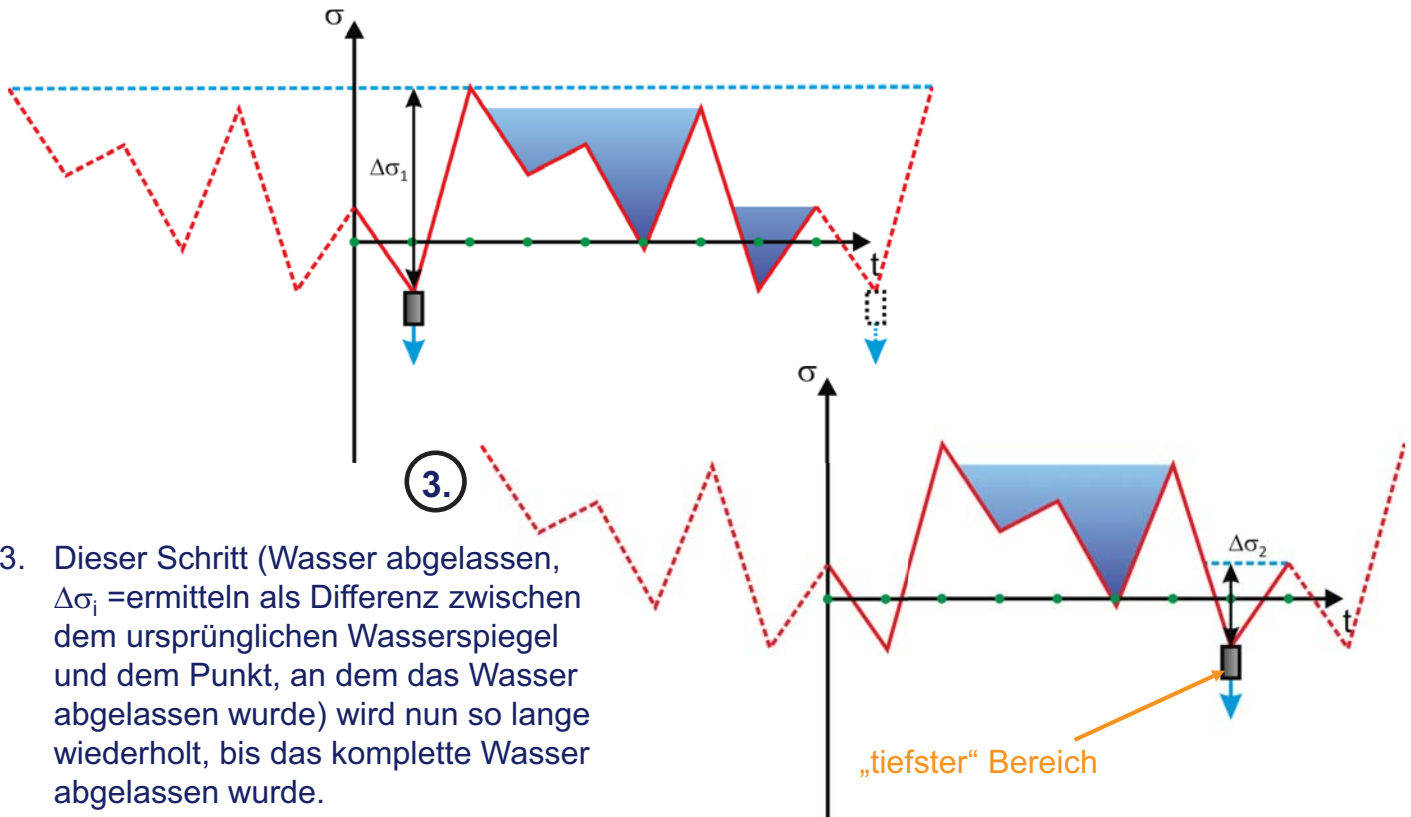
2.

2. Aus den tiefsten Stellen wird das Wasser abgelassen. Befinden sich diese Stellen im betrachteten Bereich (durchgezogene Linie), so ist  $\Delta\sigma_1$  = Differenz zwischen dem ursprünglichen Wasserspiegel und dem Punkt, an dem das Wasser abgelassen wurde.

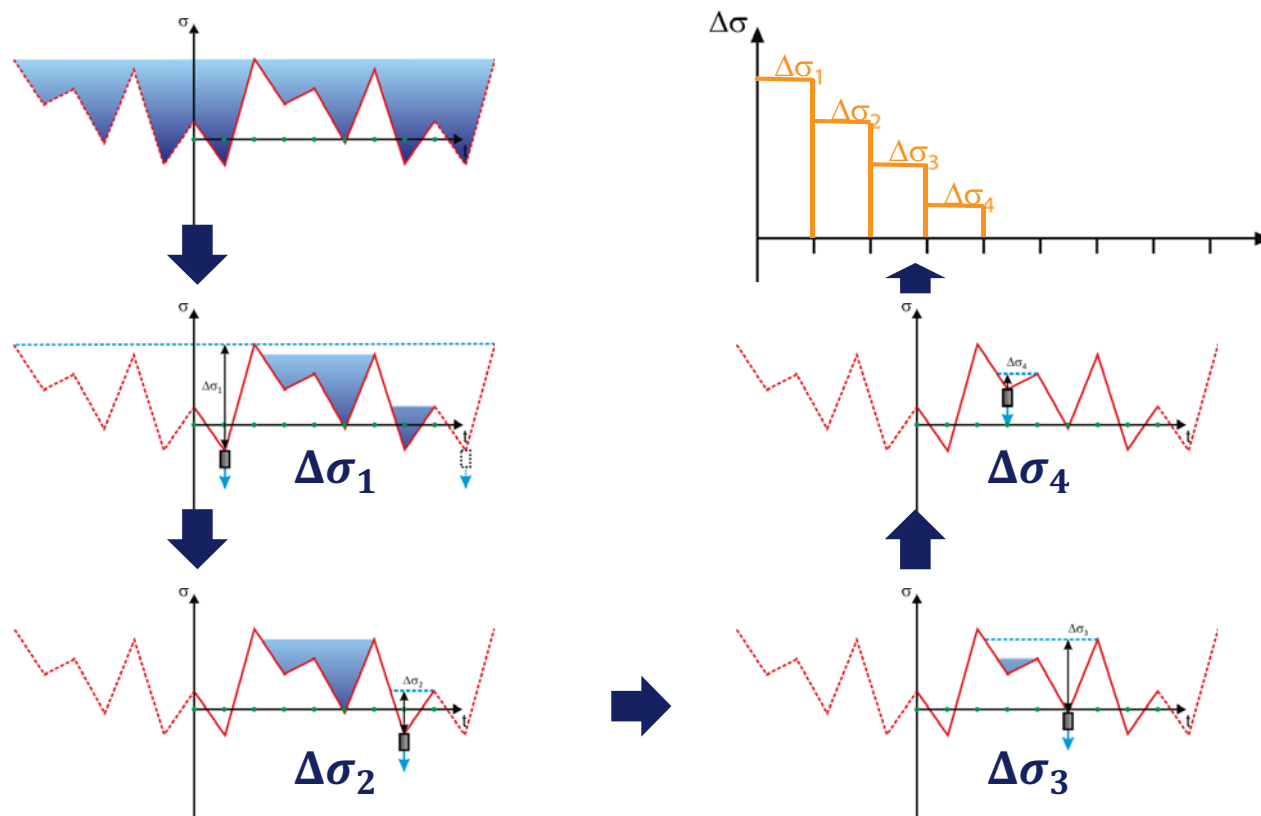




## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten



## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten



## Ermittlung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten

EN 1993-1-9, (Bild A.1)

