ERMÜDUNG · WÖHLERLINIE · DAUERFESTIGKEIT · GOODMAN · KERBWIRKUNG · REFERENZDOKUMENT · ÖFFENTLICH

Grundlagen der Dauerfestigkeit

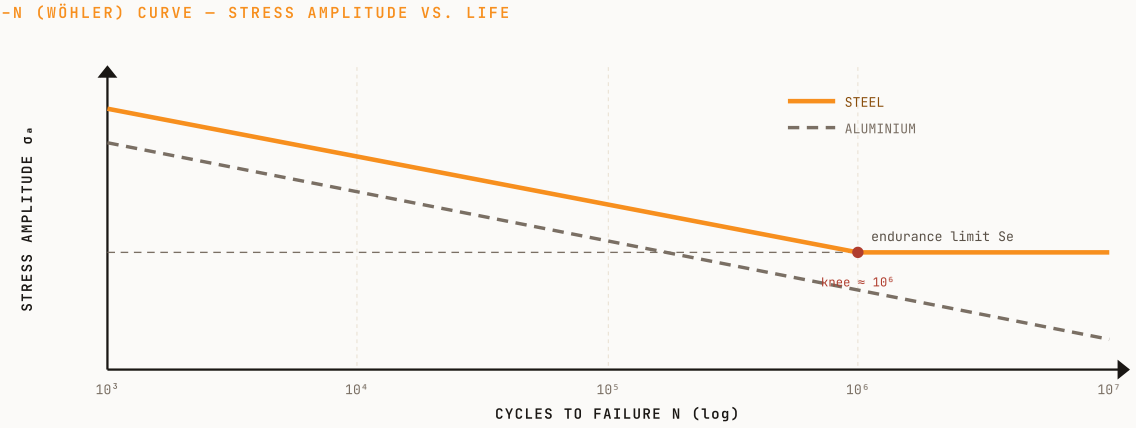
Auslegung gegen Ermüdungsbruch — Wöhlerlinie und Dauerfestigkeit, die Marin-Faktoren, die sie abmindern, die Mittelspannungskorrektur (Goodman) und die Kerben, an denen Risse tatsächlich entstehen.

REVISION	AUSGABE	VERANTWORTLICH	BEGLEITMATERIAL
1.0	June 2026	Ideambox Engineering	PDF-Referenz

KURZFASSUNG

Die meisten Maschinenteile, die im Betrieb brechen, versagen durch Ermüdung — Rissbildung unter zyklischer Beanspruchung weit unterhalb der statischen Festigkeit. Treiber ist die Spannungs*amplitude* (und die Mittelspannung); Risse wachsen von Kerben aus, und die Oberflächengüte hat einen sehr großen Einfluss. Dieser Leitfaden beschreibt den Auslegungsablauf im Bereich hoher Lastspielzahlen.

Abschnitt 1 erläutert, was Ermüdung ist. Abschnitt 2 behandelt Wöhlerlinie und Dauerfestigkeit. Abschnitt 3 enthält die Marin-Faktoren, die die Labor-Dauerfestigkeit auf einen realen Wert reduzieren. Abschnitt 4 behandelt die Mittelspannungskorrektur (Goodman / Gerber / Soderberg). Abschnitt 5 betrifft Kerbwirkung und Kerbempfindlichkeit. Abschnitt 6 enthält Konstruktionsregeln und eine Checkliste.



DIE WÖHLERLINIE. STÄHLE ZEIGEN EINE DAUERFESTIGKEIT — EINE SPANNUNG, UNTERHALB DER SIE BELIEBIG LANGE HALTEN; ALUMINIUM UND DIE MEISTEN NICHTEISENLEGIERUNGEN FALLEN WEITER AB UND WERDEN DESHALB FÜR EINE ENDLICHE LASTSPIELZAHL ANGEGEBEN. OBERFLÄCHE, GRÖSSE UND KERBEN SENKEN DEN REALEN GRENZWERT.

INHALT

1. Was Ermüdung ist
2. Wöhlerlinie und Dauerfestigkeit
3. Einflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit (Marin-Faktoren)
4. Mittelspannungskorrektur
5. Kerbwirkung
6. Konstruktionsregeln und Checkliste

1. Was Ermüdung ist

Ein wiederholt belastetes Bauteil kann bei einer Spannung weit unterhalb seiner Streckgrenze anreißen und brechen. Ein Riss entsteht an einer Kerbe, wächst mit jedem Lastspiel ein wenig und führt schließlich zum plötzlichen Restbruch des verbleibenden Querschnitts. Treiber ist die **Ausschlagspannung**, modifiziert durch die **Mittelspannung**.

1.1 Begriffe

Spannungsamplitude σ_a	Halbe Schwingbreite — (σ_max − σ_min)/2 — der wesentliche Ermüdungstreiber
Mittelspannung σ_m	(σ_max + σ_min)/2 — eine Zugmittelspannung verkürzt die Lebensdauer
Spannungsverhältnis R	σ_min / σ_max (R = −1 wechselnd, R = 0 schwellend)
Dauerfestigkeit Se	Spannungsamplitude, die ein Stahl beliebig lange erträgt (>10^6–10^7 Lastspiele)
Wöhlerlinie	Spannungsamplitude über Bruchlastspielzahl (doppeltlogarithmisch), aus Umlaufbiegeversuchen
Kt / Kf	Formzahl / Kerbwirkungszahl an einer Kerbe

Hochzyklische Ermüdung (>10^3 Lastspiele, elastisch) wird mit dem nachfolgenden Wöhler-/Dauerfestigkeitsansatz behandelt. Ermüdung bei sehr niedrigen Lastspielzahlen mit plastischer Verformung erfordert dehnungsbasierte Verfahren (hier nicht behandelt).

2. Wöhlerlinie und Dauerfestigkeit

Trägt man die Spannungsamplitude über der Bruchlastspielzahl auf, erhält man die Wöhlerlinie (S-N-Kurve):

- **Stähle** haben eine **Dauerfestigkeit**
  einen Knick bei etwa 10^6 Lastspielen, unterhalb dessen die Lebensdauer praktisch unbegrenzt ist. Der Laborschätzwert ist `Se' ≈ 0.5 · Sut` (begrenzt auf ~700 MPa bei Sut > ~1400 MPa).

- **Aluminium und die meisten Nichteisenlegierungen** haben **keine echte Dauerfestigkeit**
  die Kurve fällt weiter ab, deshalb werden sie für eine endliche Lebensdauer angegeben (z. B. Schwingfestigkeit bei 5×10^8 Lastspielen).

- Der Zeitfestigkeitsbereich zwischen ~10^3 und 10^6 Lastspielen verläuft näherungsweise log-linear; für eine Ziellebensdauer dort interpolieren.

`Se'` gilt für eine polierte Laborprobe. Das reale Bauteil ist immer schwächer — dafür gibt es die Marin-Faktoren.

3. Einflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit (Marin-Faktoren)

Den Laborwert auf einen Auslegungswert reduzieren: `Se = ka · kb · kc · kd · ke · Se'`.

FAKTOR	BERÜCKSICHTIGT	TYPISCHER WERT
ka — Oberfläche	Oberflächengüte (Risse entstehen an der Oberfläche)	geschliffen ~0.9, spanend bearbeitet ~0.7–0.8, warmgewalzt ~0.5–0.7, schmiederoh ~0.3–0.5
kb — Größe	größere Querschnitte versagen früher (Biegung/Torsion)	~1.0 (d ≤ 8 mm) bis ~0.75 (groß); Zug/Druck = 1.0
kc — Belastungsart	Biegung, Zug-Druck oder Torsion	Biegung 1.0, Zug/Druck 0.85, Torsion 0.59
kd — Temperatur	Festigkeitsänderung mit der Temperatur	~1.0 nahe Raumtemperatur
ke — Zuverlässigkeit	Streuung bei höherer Überlebenswahrscheinlichkeit	`50% 1.00, 90% 0.90, 99% 0.81, 99.9% 0.75`

Die Oberflächengüte (ka) ist meist die größte einzelne Abminderung — eine schmiederohe oder korrodierte Oberfläche kann die Dauerfestigkeit halbieren. Deshalb werden dauerfestigkeitskritische Teile geschliffen, poliert oder kugelgestrahlt. Der übliche Oberflächenfaktor ist `ka = a · Sut^b` (a, b je nach Oberfläche; Sut in MPa).

4. Mittelspannungskorrektur

Eine Zugmittelspannung senkt die zulässige Amplitude. σ_a und σ_m werden mit einem der folgenden Kriterien kombiniert:

KRITERIUM	GLEICHUNG	ANWENDUNG
Goodman (modifiziert)	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sut = 1/n$	Standard für eher spröde Werkstoffe / konservative Auslegung
Gerber	$\sigma_a/Se + (\sigma_m/Sut)^2 = 1/n$	Zähe Stähle, weniger konservativ (passt zu Versuchsdaten)
Soderberg	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sy = 1/n$	Am konservativsten; sichert auch gegen Fließen ab

Dabei ist **n** die Sicherheit gegen Dauerbruch. Goodman ist der übliche Standard. Immer zusätzlich das statische Fließen bei der Höchstspannung prüfen (σ_max ≤ Sy/n).

5. Kerbwirkung

Ermüdungsrisse entstehen an **Kerben** — Hohlkehlen, Bohrungen, Passfedernuten, Gewinden, Wellenabsätzen, Bearbeitungsriefen. Die Formzahl **Kt** multipliziert die Nennspannung; die Wirkung bei *Ermüdung* ist `Kf = 1 + q(Kt - 1)`, wobei **q** (Kerbempfindlichkeit, 0–1) mit der Werkstofffestigkeit und dem Kerbradius zunimmt.

- Kf auf die *Ausschlag*spannung (und häufig auch auf die Mittelspannung) im Goodman-Nachweis anwenden.
- Ein großzügiger **Übergangsradius** ist die billigste Verbesserung der Dauerfestigkeit
  scharfe Innenecken sind Rissfabriken.
- **Gewinde, Passfedernuten und die Ränder von Pressverbänden sind klassische Anrissstellen**
  aus den höchstbeanspruchten Bereichen heraushalten oder sorgfältig gestalten (gerollte Gewinde, Freistichradien).

6. Konstruktionsregeln und Checkliste

- **Jede Innenecke ausrunden**
  Übergangsradien an Wellenabsätzen und Querschnittsübergängen maximieren.

- **Oberfläche verbessern**, wo die Spannung hoch ist
  feine Oberflächengüte sowie Kugelstrahlen / Festwalzen zur Erzeugung von Druckeigenspannungen (steigert die Schwingfestigkeit deutlich).

- **Kerben nicht überlagern**
  keine Bohrung in eine Hohlkehle im hochbeanspruchten Bereich setzen.

- **Mittelspannung niedrig halten**
  Vorspannung, Druckeigenspannungen und symmetrische Belastung helfen.

- **Schweißnähte richtig gestalten**
  Nahtübergänge sind scharfe Kerben; Nahtübergänge beschleifen/hämmern und nach Kerbfall klassifizierte Nahtdetails verwenden.

- **Checkliste:** σ_a und σ_m im kritischen Querschnitt bestimmen → Kf anwenden → Se = ka·kb·kc·kd·ke·Se′ abschätzen → Goodman für die Sicherheit n anwenden → statisches Fließen bei σ_max prüfen → wenn knapp, zuerst Oberflächengüte, Übergangsradien und Eigenspannungen angehen.

Ergänzend zu den Ideambox-Rechnern für Federn und Schraubenverbindungen, deren Ermüdungsnachweise genau diesen Goodman-Ansatz verwenden.

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/de/downloads/fatigue-design-primer/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact