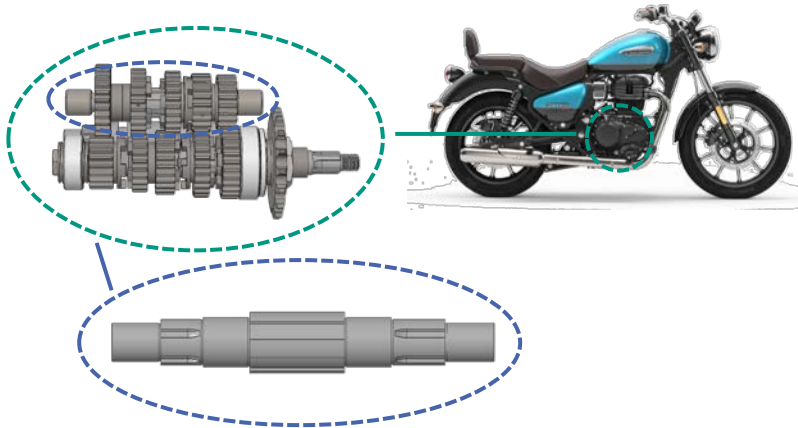


Dimensionierung III – Dimensionieren mit Einflussfaktoren

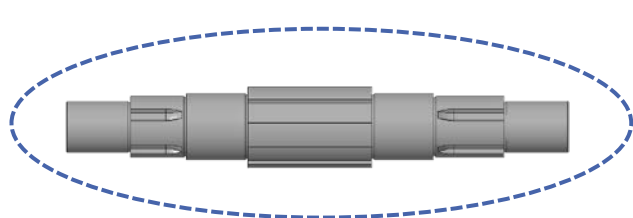
Vorlesung Maschinenkonstruktionslehre C – WS25/26

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen



Maschinenkonstruktionslehre C - Dimensionierung III

Inhaltsverzeichnis



Lernziele & Einleitung



Kerben



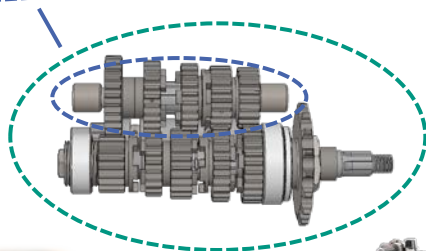
Einflussfaktoren



Kombinierte Lastfälle

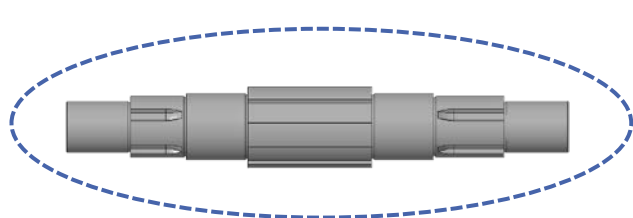


Zusammenfassung



Maschinenkonstruktionslehre C - Dimensionierung III

Inhaltsverzeichnis



Lernziele & Einleitung



Kerben



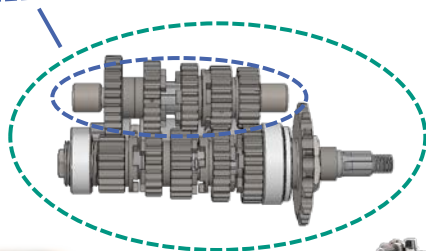
Einflussfaktoren



Kombinierte Lastfälle



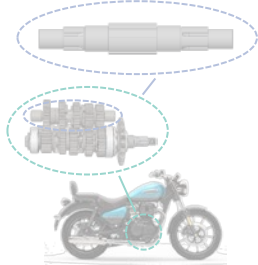
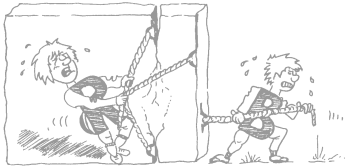
Zusammenfassung



Dimensionierung – Einleitung

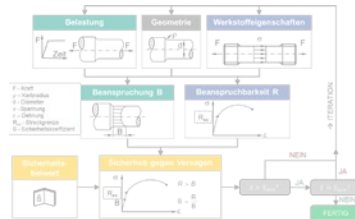
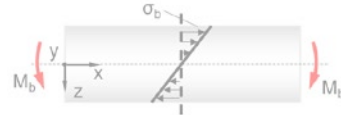
Übersicht Vorlesungen Dimensionierung

Dimensionierung I



Einführung und Grundlagen

Dimensionierung II

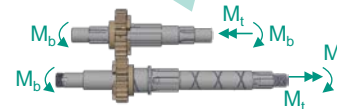


Ermitteln der Grundgrößen der Dimensionierung

Dimensionierung III

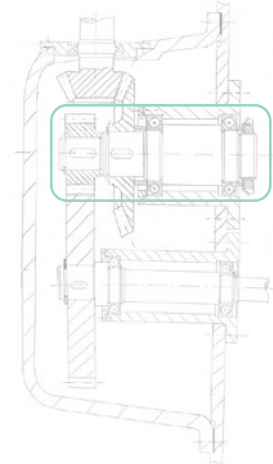


$$K_{\sigma} = \left(\frac{\beta_{\sigma}}{K_2} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} \cdot \frac{1}{K_1}$$



Dimensionieren mit Einflussfaktoren

Übung



Dimensionieren nach DIN 743

Lernziele der Vorlesung

Dimensionierung III – Dimensionieren mit Einflussfaktoren

Problem

Das reale Bauteil besitzt häufig keine einfache Geometrie und ist unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt. Wie können wir das bei der Dimensionierung in frühen Phasen der Produktentwicklung berücksichtigen?

Ziele

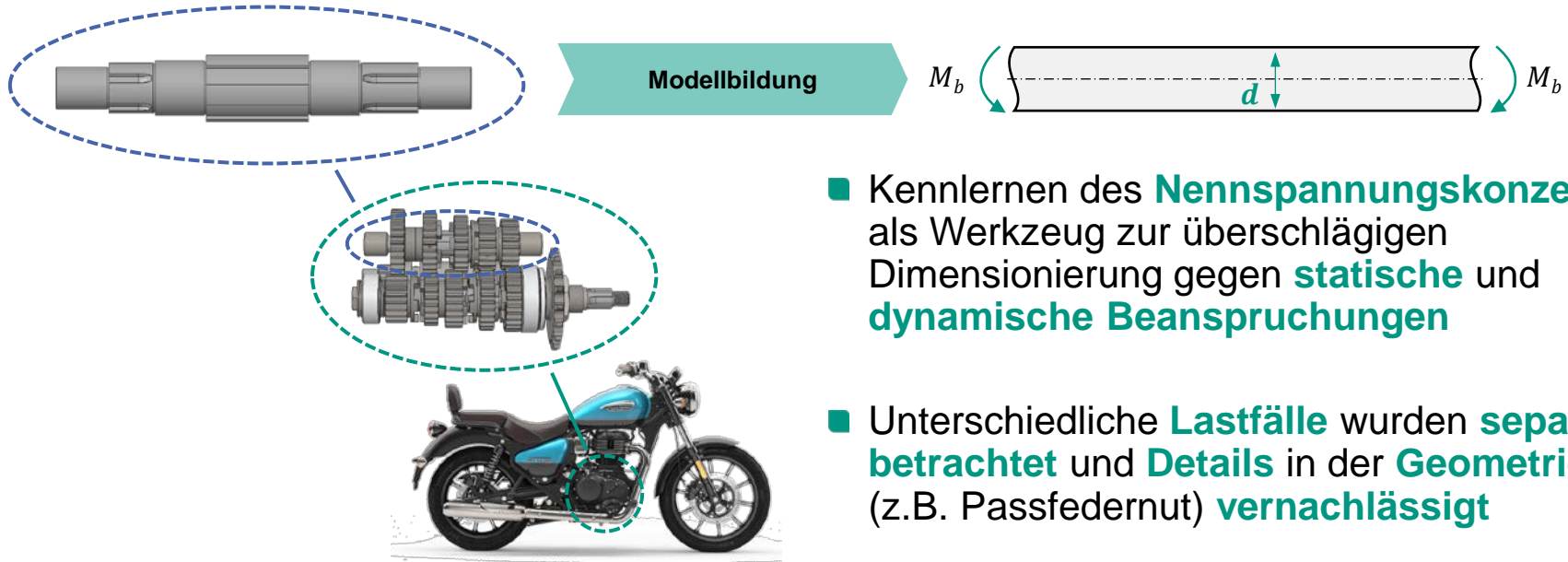
- Den Einfluss der **Kerbform** und der **Belastungsart** auf die **Spannungsüberhöhung** infolge der Kerbe erklären können.
- Die Auswirkung einer **teilplastischen Auslegung** bei duktilen Werkstoffen auf die **Kerbwirkung** erklären können.
- Den Einfluss von **Kerben** bei einer **dynamischer Beanspruchung** erklären können.
- Die Anteile des **Gesamteinflussfaktors** zur Berücksichtigung weiterer Einflüsse nennen können.
- Den Einfluss der **Oberflächenrauheit**, der **Oberflächenverfestigung** sowie der **Größe** eines Bauteils auf die **Dauerfestigkeit** erklären können.
- Das **Ellipsenverfahren** für die Dimensionierung bei **kombinierten Lastfällen** verstehen und anwenden können.

Fazit

Zur Berücksichtigung der am realen Bauteil auftretenden Einflüsse kann für die Dimensionierung in frühen Phasen der Produktentwicklung weiterhin das Nennspannungskonzept verwendet werden. Dabei wird die Kerbwirkung, die **Oberflächenrauheit** und **Oberflächenverfestigung** sowie **größenabhängige** Einflüsse über Korrekturfaktoren berücksichtigt, **welche die Beanspruchung oder die Beanspruchbarkeit des idealen Bauteils korrigieren.**

Dimensionierung III – Einleitung

Rückblick Dimensionierung II

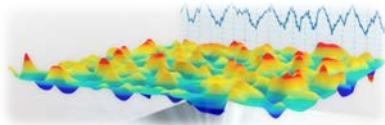


→ Dimensionierung unter **Verwendung einfacher Annahmen** (z.B. keine Kerben)



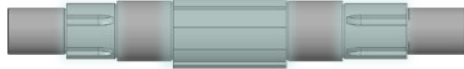
Dimensionierung III – Einleitung

Das reale Bauteil besitzt häufig keine einfache Geometrie und ist unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt

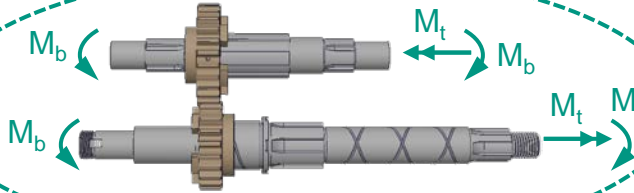


Fertigungsbedingte Einflüsse
(z.B. Oberflächenrauheit)

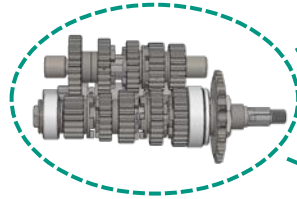
Kerben



Kombinierte Lastfälle



Umgebungseinflüsse



Wie können die an dem realen Bauteil auftretenden Einflüsse in der Dimensionierung berücksichtigt werden?

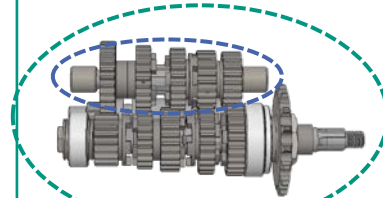


Dimensionierung III – Einleitung

Wie können die an dem realen Bauteil auftretenden Einflüsse in der Dimensionierung berücksichtigt werden?

Abschätzung über Werkstoffkennwerte

- Bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses möglich
- Geringer Aufwand
- Hohe Unsicherheit (Modellbildung notw.)




Ermittlung Beanspruchbarkeit durch Versuch

Prototypenversuche

- Erfassung vieler Einflüsse
- Hoher Aufwand
- Erst sehr spät im Produktentwicklungsprozess möglich




$$K_{\sigma} = \left(\frac{\beta_{\sigma}}{K_2} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} \cdot \frac{1}{K_1}$$

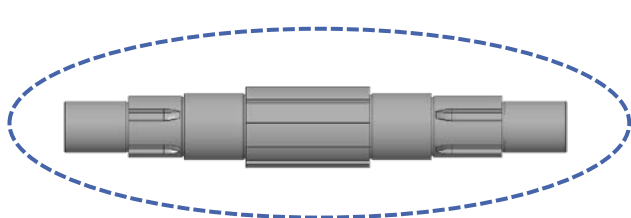
Diese Vorlesung:

Zur Berücksichtigung von an dem realen Bauteil auftretenden Einflüssen kann weiterhin das Nennspannungskonzept verwendet werden, indem die Beanspruchung und die Beanspruchbarkeit über Korrekturfaktoren korrigiert wird.



Maschinenkonstruktionslehre C - Dimensionierung III

Inhaltsverzeichnis



Lernziele & Einleitung



Kerben



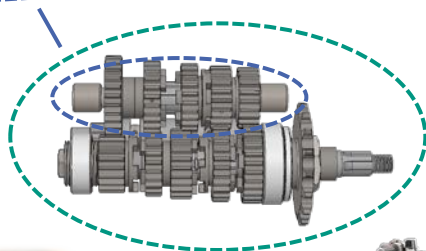
Einflussfaktoren



Kombinierte Lastfälle

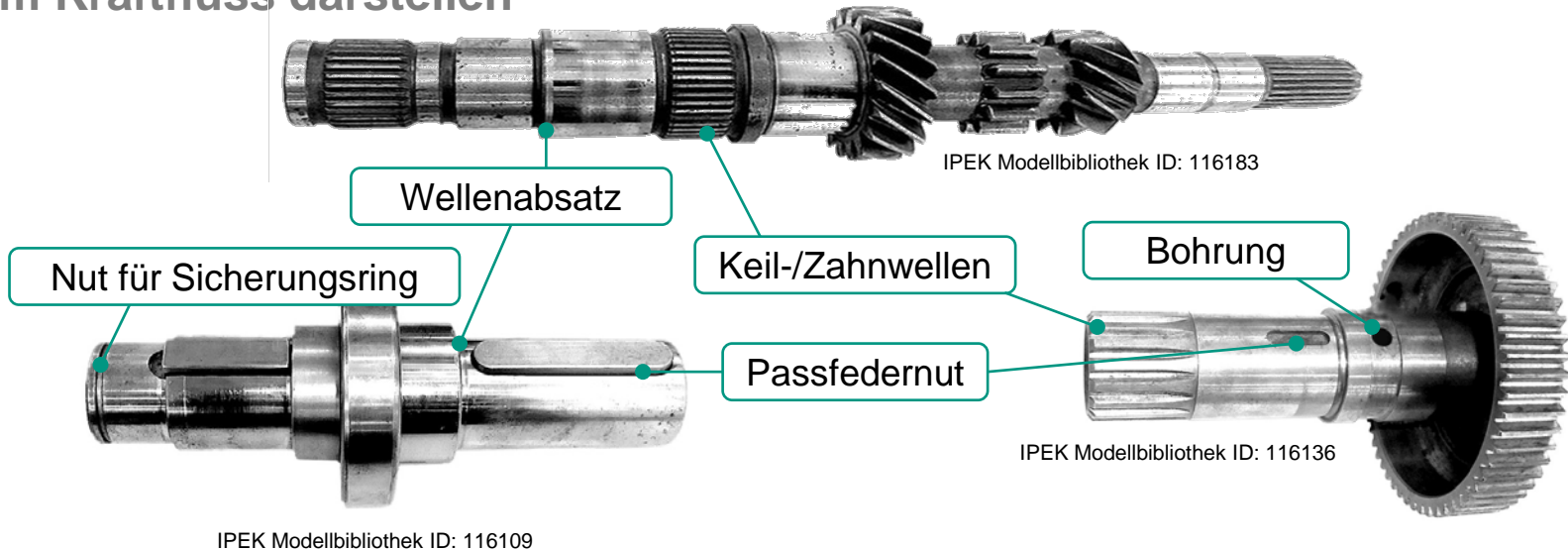


Zusammenfassung

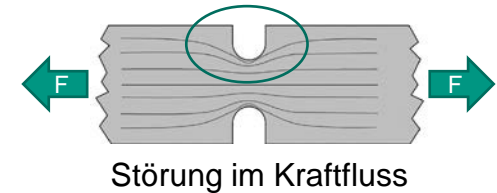


Dimensionierung – Kerben

In Getriebewellen sind viele Kerben vorhanden, die eine Störung im Kraftfluss darstellen

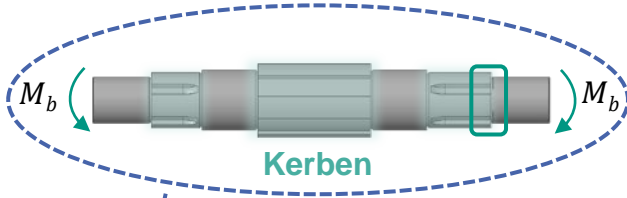


- Im Vergleich zu einem idealen Rundstab sind an einer realen Getriebewelle viele konstruktive Anpassungen der Gestalt vorhanden, welche für die Erfüllung der Funktionen (z.B. Drehmoment übertragen) notwendig sind.
- Die Änderungen in der Geometrie stellen eine **Störung im Kraftfluss** dar und werden als **Kerben** bezeichnet.

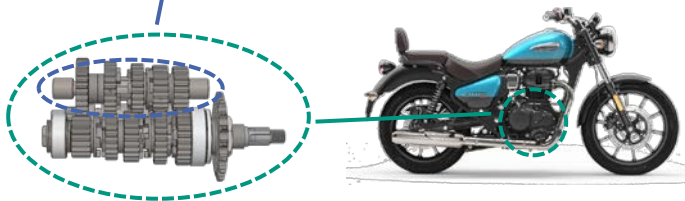
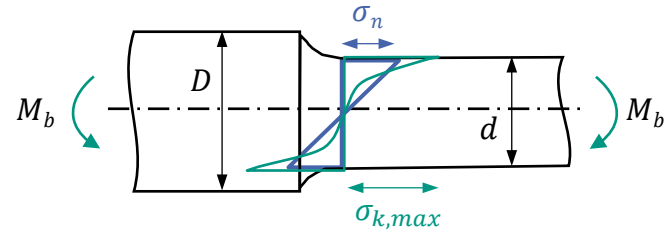


Dimensionierung – Kerben

Warum müssen Kerben bei der Dimensionierung berücksichtigt werden?



Modellbildung



Korrekturfaktor: „Kerbformzahl“ ≥ 1

$$\sigma_{k,max} = \alpha_k \sigma_n$$

Korrigierte Beanspruchung

Beanspruchung für ungerbten Rundstab

Kernaussage

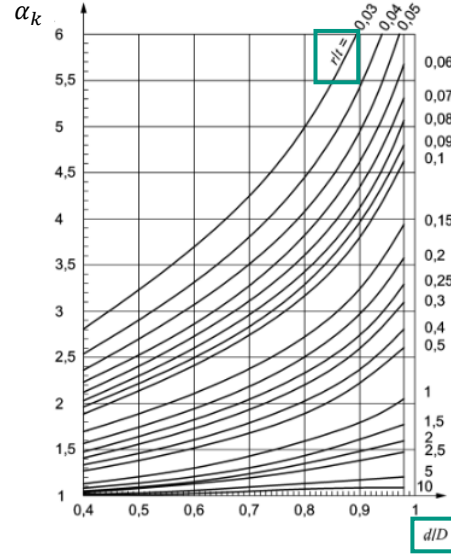
Kerben führen zu einer **Spannungsüberhöhung** und müssen daher bei der Dimensionierung berücksichtigt werden.
Unter Verwendung des Nennspannungskonzepts wird die Beanspruchung mithilfe der **Kerbformzahl** nach oben korrigiert.

- Legende:
- M_b [Nmm] ... Biegemoment
 - $\sigma_{k,max}$ [MPa] ... Max. Normalspannung infolge der Kerbe
 - σ_n [MPa] ... Nennnormalspannung
 - α_k [] ... Kerbformzahl
 - d [mm] ... Durchmesser am Kerbgrund
 - D [mm] ... Durchmesser am Wellenabsatz

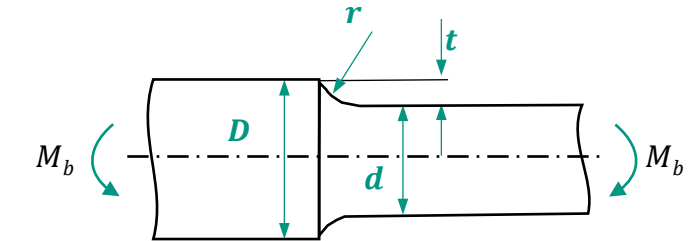
Dimensionierung – Kerben

Die Spannungsüberhöhung ist abhängig von der Kerbform

- Der Einfluss der Kerbe ist **abhängig** von der Geometrie der Kerbe (**Kerbform**)
- Durch eine **geeignete Gestaltung** der Kerbform kann die **Spannungserhöhung reduziert** werden
- Für **häufig auftretende Kerbformen** kann die Kerbformzahl aus **empirisch bestimmten Diagrammen** abgelesen werden



Kerbformzahlen für gekerbte Rundstäbe (DIN 743-2)



Parameter zur Beschreibung der Kerbform: d/D , r/t

$$\sigma_{k,max} = \alpha_k \sigma_n$$

Legende:

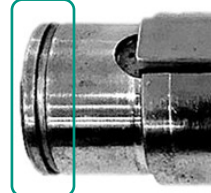
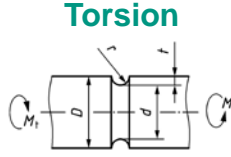
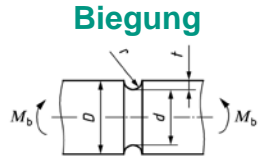
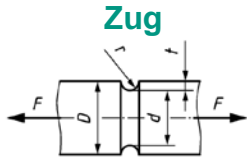
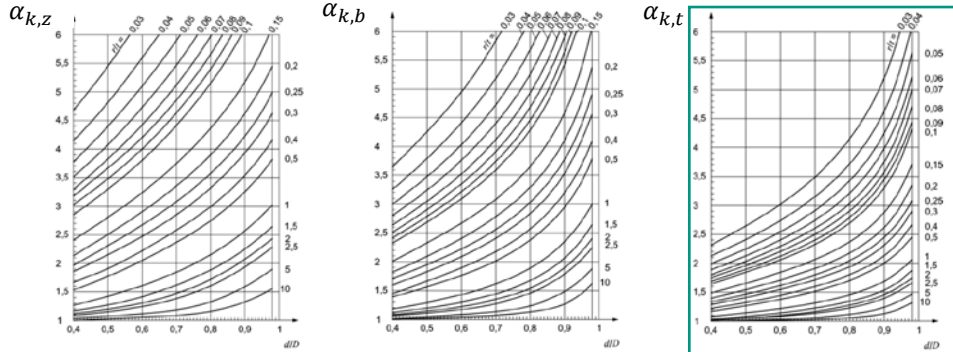
- M_b [Nmm] ... Biegemoment
- $\sigma_{k,max}$ [MPa] ... Max. Normalspannung infolge der Kerbe
- σ_n [MPa] ... Nennnormalspannung
- α_k [] ... Kerbformzahl
- d [mm] ... Durchmesser am Kerbgrund
- D [mm] ... Durchmesser am Wellenabsatz
- r [mm] ... Kerbradius
- t [mm] ... Kerbtiefe

Wenn das Verhältnis von Kerbradius zu Kerbtiefe ~~kleiner~~ **größer** wird, dann ist die Spannungsüberhöhung geringer, weil der Kraftfluss weniger stark umgelenkt wird.

Dimensionierung – Kerben

Die Spannungsüberhöhung ist abhängig von der Belastungsart

- Der Einfluss der Kerbe unterscheidet sich je nach Belastungsart
- Die empirisch bestimmten Diagramme sind daher immer nur für eine bestimmte Belastungsart gültig



z.B. Nut für Sicherungsring

- Die Kerbwirkung an der Nut für den Sicherungsring ist bei Torsion geringer als bei Zug und Biegung. Warum ist das so?
- ➔ Bei **Torsion** der gekerbten Welle liegt die **Hauptspannung parallel zur Kerbrichtung**
- ➔ Der Kraftfluss wird daher für diesen Fall weniger stark beeinflusst

Kernaussage
 Die Spannungserhöhung durch die Kerbe ist von der Kerbform und der Belastungsart abhängig. **Wenn** die Beanspruchungsrichtung parallel zur Kerbrichtung liegt, **dann** ist die Kerbwirkung geringer, **weil** der Kraftfluss weniger stark umgelenkt wird.

- Legende:
 M_b [Nmm] ... Biegemoment
 M_t [Nmm] ... Torsionsmoment
 F [N] ... Kraft
 $\alpha_{k,b}$ [] ... Kerbformzahl für Biegung
 $\alpha_{k,t}$ [] ... Kerbformzahl für Torsion
 $\alpha_{k,z}$ [] ... Kerbformzahl für Zug
 d [mm] ... Durchmesser am Kerbgrund
 D [mm] ... Durchmesser am Wellenabsatz
 r [mm] ... Kerbradius
 t [mm] ... Kerbtiefe

Dimensionierung – Kerben

Bei der Dimensionierung gegen statische Beanspruchung werden Kerben in der Grundgleichung auf der Beanspruchungsseite berücksichtigt

Spröde Werkstoffe

- Überschreiten der Zugfestigkeit führt zu spontanem Versagen
- Dimensionierung gegenüber Sprödbruch

$$B \quad \sigma_{k,max} = \alpha_k \sigma_n < \frac{R_m}{S_B} \quad S_B \approx 2 - 3$$

- Dies gilt auch bei **lokal sprödem** Verhalten!
 - z.B. in Aufhärtungszonen bei Schweißnähten



Risse an der Schweißnaht bei Rohrverbindungen (z.B. Fahrradrahmen)

Duktile Werkstoffe

- Spannungsspitzen können durch lokale Fließvorgänge abgebaut werden
→ **Stützwirkung** ausnutzen durch teilplastische Auslegung

Legende:

R_m [MPa] ... Zugfestigkeit

$\sigma_{k,max}$ [MPa] ... Max. Normalspannung infolge von Kerbe

σ_n [MPa] ... Nennnormalspannung

α_k [] ... Kerbformzahl

S_B [] ... Sicherheit gegen Sprödbruch



Dimensionierung – Kerben

Bei duktilen Werkstoffen können Spannungsspitzen durch lokale Fließvorgänge abgebaut werden

Vorgehen für teilplastische Auslegung

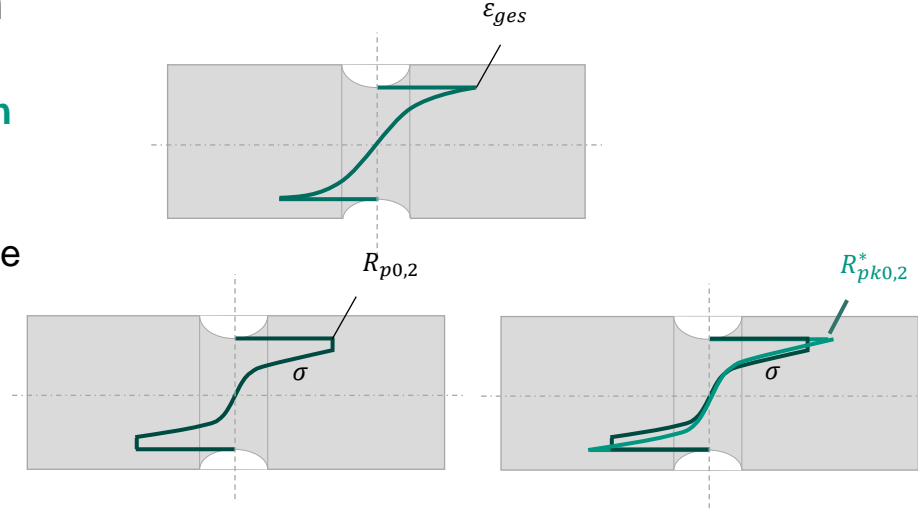
- Prinzipiell **gleiches** Vorgehen wie bei **ungekerbten Bauteilen**
- **0,2% plastische Dehnung akzeptabel**, wenn keine Funktionsbeeinträchtigung vorliegt
- Annahme: Gleicher Spannungsverlauf wie im elastischen Fall mit fiktivem Werkstoffwiderstand „**Kerbformdehngrenze**“ $R_{pk0,2}^*$

- Es soll gelten: vgl. ohne Kerbe:

$$\boxed{\frac{M_{b,p0,2}}{W_b} * \alpha_{kb}} = \boxed{R_{pk0,2}^*}$$

B R

$$\frac{M_{b,p0,2}}{W_b} = R_{p0,2}$$



Legende:

ϵ_{ges} [] ... Gesamtdehnung

σ [MPa] ... Normalspannung

α_{kb} [] ... Kerbformzahl für Biegung

$M_{b,p0,2}$ [Nm] ... Biegemoment bei 0,2% plastischer Verformung am Rand bzw. Kerbgrund

W_b [mm³] ... Biege Widerstandsmoment

$R_{p0,2}$ [MPa] ... 0,2%-Dehngrenze

$R_{p0,2}^*$ [MPa] ... Formdehngrenze

$R_{pk0,2}^*$ [MPa] ... Kerbformdehngrenze

Dimensionierung – Kerben

Die Stützwirkung ist von dem Werkstoff abhängig

- Analog zu ungekerbten Bauteilen kann der fiktive Werkstoffwiderstand $R_{pk0,2}^*$ mithilfe des Kerbformdehngrenzenverhältnisses $\delta_{k0,2}$ berechnet werden

$$\delta_{k0,2} =: \frac{R_{pk0,2}^*}{R_{p0,2}} \rightarrow \text{Maß für die Stützwirkung, je größer desto größer der Widerstand R}$$

$$\frac{M_{b,p0,2}}{W_b} * \alpha_{kb1} = R_{pk0,2}^*$$

B R

- $\delta_{k0,2}$ kann näherungsweise bestimmt werden

- z.B. für Stähle mit **ausgeprägter Fließgrenze**: $\delta_{k0,2} = 1 + 0,95 \cdot (\bar{\alpha}_{kpl} - 1) \cdot \sqrt[4]{\frac{200}{R_{eL}}}$

$$R_{eL} \uparrow \rightarrow \delta_{k0,2} \downarrow$$

z.B. aus Normen, Tabellenbüchern

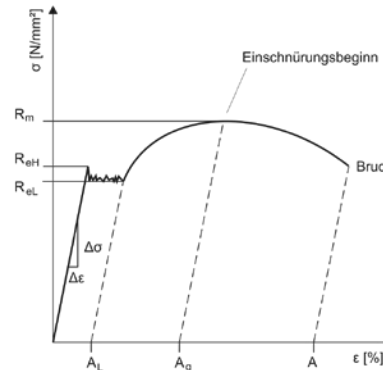
$$\bar{\alpha}_{kpl} = \alpha_k \cdot \tilde{\alpha}_{pl}$$

Legende:

- $\bar{\alpha}_{kpl}$ [] ... Plastische Kerbformzahl
- $\tilde{\alpha}_{pl}$ [] ... Plastische Formzahl ohne Kerbe
- α_k [] ... Kerbformzahl
- R_e [MPa] ... Streckgrenze
- $R_{p0,2}$ [MPa] ... 0,2%-Dehngrenze
- R_{eL} [MPa] ... Untere Streckgrenze
- R_{eH} [MPa] ... Obere Streckgrenze
- A [] ... Bruchdehnung
- A_g [] ... Gleichmaßdehnung
- A_L [] ... Lüdersdehnung
- $\delta_{k0,2}$ [] ... Kerbformdehngrenzenverhältnis

Kernaussage

Wenn ich hochfeste Werkstoffe verwende (hohe R_e), dann ist die Stützwirkung geringer, weil solche Werkstoffe i. A. eine geringere plastische Verformbarkeit aufweisen und daher Spannungsspitzen durch Fließvorgänge weniger stark abgebaut werden können.



Dimensionierung – Kerben

Beispielrechnung: Wie wirkt sich die teilplastische Auslegung bei duktilen Werkstoffen auf die Kerbwirkung aus?

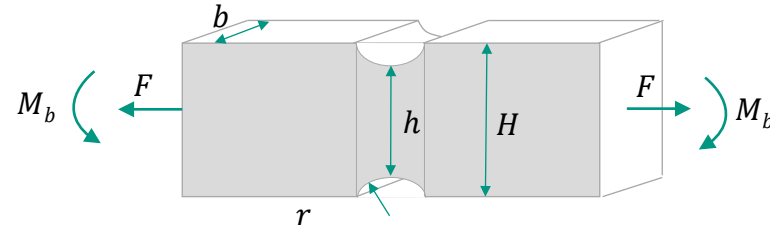
■ Gegeben:

- $S_f = 2$
- $\tilde{\alpha}_{pl,z} = 1$ Ohne Kerbe, Zugbelastung
- $\alpha_{k,z} = 4$ U-förmige Kerbe
- $\bar{\alpha}_{kpl,z} = \alpha_{kz} \cdot \tilde{\alpha}_k = 4$ Kerbe, Zugbelastung
- $R_{e,St37} = 225 \frac{N}{mm^2}$
- $A_k = b \cdot h = 20mm \cdot 40mm = 800 mm^2$

■ Gesucht:

→ Gewinn bei teilplastischer Auslegung mit 0,2% plastischer Dehnung?

Maschinengestell Querträger



Nur Zugbeanspruchung wird betrachtet!

Legende:

- $\bar{\alpha}_{kpl,z}$ [] ... Plastische Kerbformzahl für Zug
- $\tilde{\alpha}_{pl,z}$ [] ... Plastische Formzahl ohne Kerbe für Zug
- $\alpha_{k,z}$ [] ... Kerbformzahl für Zug
- $R_{e,St37}$ [MPa] ... Streckgrenze für Baustahl
- S_f [] ... Sicherheit gegen Fließen
- A_k [mm²] ... Querschnitt im Kerbgrund
- M_b [Nmm] ... Biegemoment
- F [N] ... Zugkraft
- b [mm] ... Breite
- h [mm] ... Höhe im Kerbgrund
- H [mm] ... Höhe Querträger

Dimensionierung – Kerben

Beispielrechnung: Wie wirkt sich die teilplastische Auslegung bei duktilen Werkstoffen auf die Kerbwirkung aus?

■ Geltende Zusammenhänge:

- $\sigma_{n,zul,el} = \frac{R_e}{\alpha_{k,z} \cdot S_f}$ (Rein elastische Beanspruchung)

- $\sigma_{n,zul,0,2} = \frac{\delta_{k0,2} \cdot R_e}{\alpha_{k,z} \cdot S_f}$ (Teilplastische Beanspruchung)

■ Kerbformdehngrenzenverhältnis:

- $\delta_{k0,2} = 1 + 0,95 \cdot (\bar{\alpha}_{kpl,z} - 1) \cdot \sqrt[4]{\frac{200}{R_{e,St37}}} = 3,77$

- $\sigma_{n,zul,0,2} = 3,77 \cdot \sigma_{n,zul,el}$

→ **Erhöhung der Tragfähigkeit** durch teilplast. Auslegung um das fast **3,8-fache!**

Kernaussage

Bei duktilen Werkstoffen können durch Ausnutzen der Stützwirkung lokale Spannungsspitzen „abgebaut“ werden.

Durch eine geeignete Werkstoffwahl und Gestaltung der Kerbform kann damit durch die teilplastischen Auslegung die Kerbwirkung fast vollständig aufgehoben werden.

- $\bar{\alpha}_{kpl,z} = \alpha_{k,z} \cdot \tilde{\alpha}_{pl,z}$

■ Kerbwirkung vs. Stützwirkung

- $\frac{\delta_{k0,2}}{\alpha_{k,z}} = 0,943$

→ Stützwirkung hebt Kerbwirkung fast vollständig auf!

Legende:

$\bar{\alpha}_{kpl,z}$ [] ... Plastische Kerbformzahl für Zug

$\tilde{\alpha}_{pl,z}$ [] ... Plastische Formzahl ohne Kerbe für Zug

$\alpha_{k,z}$ [] ... Kerbformzahl für Zug

R_e [MPa] ... Streckgrenze

S_f [] ... Sicherheit gegen Fließen

$\delta_{k0,2}$ [] ... : Kerbformdehngrenzenverhältnis

$\sigma_{n,zul,0,2}$ [MPa] ... Zulässige Normalspannung bei 0,2% Dehnung

$\sigma_{n,zul,el}$ [MPa] ... Zulässige Normalspannung bei rein elastischer Beanspruchung

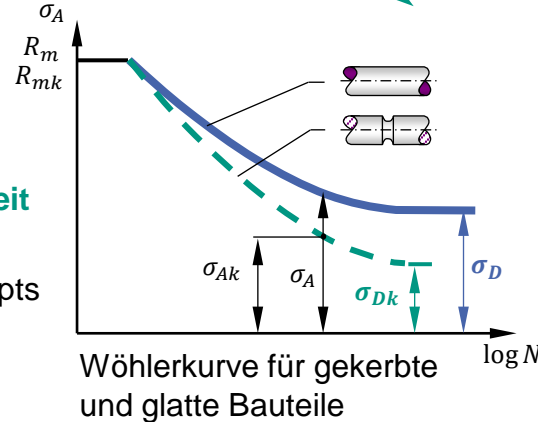


Dimensionierung – Kerben

Welchen Einfluss haben Kerben bei einer dynamischen Beanspruchung?

Beispiel Getriebewelle

- **Dynamische** Beanspruchung durch **Umlaufbiegung** (wechselnd)
- Bei dynamischen Beanspruchungen führen Kerben zu einer **Reduktion der Dauerfestigkeit**
- Unter Verwendung des Nennspannungskonzepts wird die Beanspruchbarkeit mithilfe der **Kerbwirkungszahl** nach unten korrigiert
 - (vgl. statisch: Erhöhung der Beanspruchung)



Beanspruchbarkeit für ungekerbten Rundstab

$$\sigma_{DK} = \frac{\sigma_D}{\beta_k}$$

Korrekturfaktor: „Kerbwirkungszahl“

Korrigierte Beanspruchbarkeit

Kernaussage

Kerben reduzieren bei dynamischer Beanspruchung die dauerhaft ertragbare Spannungsamplitude.

Dieser Effekt wird durch die **Kerbwirkungszahl** β_k abgebildet.

Legende:

R_m [MPa] ... Zugfestigkeit glatt
 R_{mk} [MPa] ... Zugfestigkeit gekerbt
 σ_A [MPa] ... Ertragbare Spannungsamplitude glatt
 σ_{Ak} [MPa] ... Ertragbare Spannungsamplitude gekerbt
 σ_D [MPa] ... Dauerfestigkeit glatt
 σ_{Dk} [MPa] ... Dauerfestigkeit gekerbt
 N [] ... Lastspielzahl
 M_b [Nmm] ... Biegemoment
 β_k [] ... Kerbwirkungszahl

Dimensionierung – Kerben

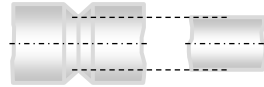
Wie stark ist Einfluss von Kerben bei einer dynamischer Beanspruchung im Vergleich zu einer statischen Beanspruchung?

- Die Beanspruchbarkeit wird häufig **nicht im selben Maße reduziert** wie die Beanspruchung bei einer statischen Beanspruchung erhöht wird
- Gründe
 - Entlastungsvorgänge** (die Beanspruchung ist nicht dauerhaft auf max. Wert)
 - Stützwirkung** durch Material

$$1 \leq \beta_k \leq \alpha_K$$

α_K - Statisch
 β_k - Dynamisch

Grenzfälle



- $\beta_k \approx 1$
 - Dauerfestigkeit im Kerbgrund ist gleich wie bei einem ungekerbten Stab gleichen Durchmessers
 - Kerbunempfindliche Werkstoffe** (z.B. Grauguss)

- $\beta_k \approx \alpha_K$
 - Dauerfestigkeit wird in gleichem Maße wie bei statischer Beanspruchung reduziert
 - Kerbempfindliche Werkstoffe** (z.B. hochfeste Stähle, allg. spröde Werkstoffe)

Kernaussage

Aufgrund von **Entlastungsvorgängen** und der **Stützwirkung** ist die **Kerbwirkung** bei einer **dynamischen** Beanspruchung **meistens geringer** als bei einer statischen Beanspruchung.

Vorsicht bei **spröden, hochfesten Werkstoffen!** Hier wirkt sich die **Kerbwirkung** bei **dynamischer** Beanspruchung **besonders stark aus** (Worst Case: wirkt wie bei einer statischen Beanspruchung).

Legende:

- α_k [] ... Kerbformzahl
- β_k [] ... Kerbwirkungszahl
- σ_D [MPa] ... Dauerfestigkeit glatt
- σ_{Dk} [MPa] ... Dauerfestigkeit gekerbt

Dimensionierung – Kerben

Die Kerbwirkung bei dynamischer Beanspruchung ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, was eine Abschätzung über die Kerbwirkungszahl komplex macht

- Für bestimmte Fälle (z.B. Verwendung von kerbempfindlichen Werkstoffen oder einer Worst-Case Betrachtung ($\beta_k = \alpha_k$)) kann die Kerbwirkungszahl über die **Grenzfälle angenähert** werden
- Eine genaue Bestimmung der Kerbwirkungszahl ist komplex, da diese aus einer **Überlagerung unterschiedlicher Faktoren** abhängt

$$\beta_k = f(\text{Kerbform, Lastfall, Werkstoff, (Mittelspannung)})$$

- Eine **genaue Bestimmung** ist daher nur über **Versuche** möglich
- Berechnungsansätze beruhen auf **empirischen Ansätzen**
 - z.B. Verfahren von Stieler (s. Übung)
- Für die in der Praxis häufig auftretenden Kerben können Diagramme genutzt werden (DIN 743-2)
 - Diese gelten immer nur für **einen bestimmten Durchmesser der Probe!**

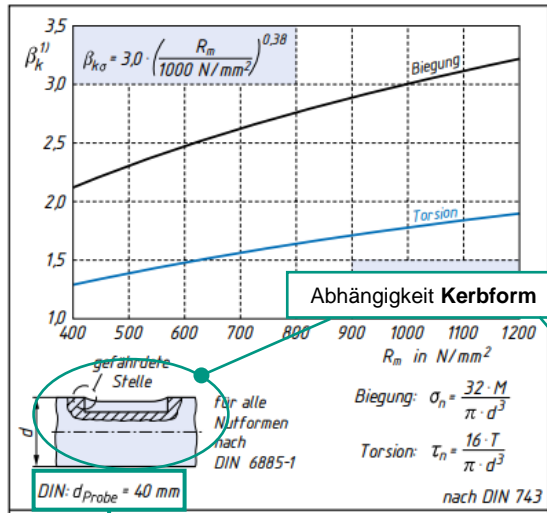
Legende:
 α_k [] ... Kerbformzahl
 β_k [] ... Kerbwirkungszahl



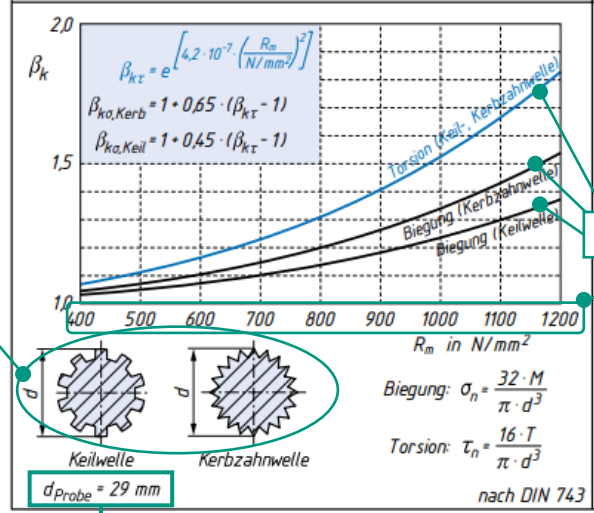
Dimensionierung – Kerben

Für Standardfälle kann die Kerbwirkungszahl aus empirisch bestimmten Diagrammen abgelesen werden

Beispiel Kerbwirkungszahlendiagramme Passfedernut und Keil-/Kerbzahnwelle



Abhängigkeit Kerbform



Die Kerbwirkung ist bei einer Keilwelle unter Torsion am größten, bei einer Passfedernut unter Biegung. Warum ist das so?

- vgl. statische Beanspruchung
- Bei der Keilwelle unter Torsion liegt die Beanspruchungsrichtung (umlaufend) quer zur Kerbrichtung (parallel zur Achse)

Abhängigkeit Lastfall

Abhängigkeit Werkstoff

- Legende:
- M [Nmm] ... Biegemoment
 - T [Nmm] ... Torsionsmoment
 - σ_n [MPa] ... Nennnormalspannung
 - τ_n [MPa] ... Nennschubspannung
 - $\beta_{k\sigma}$ [] ... Kerbwirkungszahl für Biegung
 - $\beta_{k\tau}$ [] ... Kerbwirkungszahl für Torsion
 - d [mm] ... Durchmesser am Kerbgrund
 - D [mm] ... Durchmesser am Wellenabsatz
 - r [mm] ... Kerbradius
 - d_{Probe} [mm] ... Probendurchmesser am Kerbgrund
 - R_m [MPa] ... Zugfestigkeit

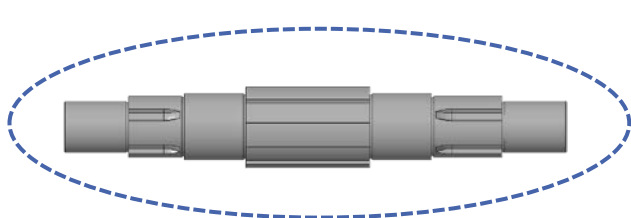
Diagramm gilt nur für einen bestimmten Durchmesser!

(Roloff und Matek nach DIN 743)



Maschinenkonstruktionslehre C - Dimensionierung III

Inhaltsverzeichnis



Lernziele & Einleitung



Kerben



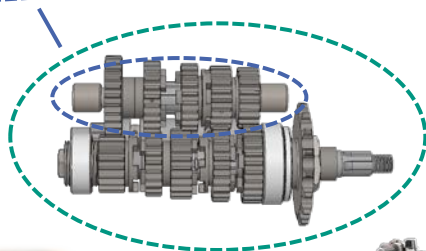
Einflussfaktoren



Kombinierte Lastfälle



Zusammenfassung



Dimensionierung – Einflussfaktoren

Neben der Kerbwirkung gibt es weitere Einflüsse, die sich auf die Beanspruchbarkeit auswirken

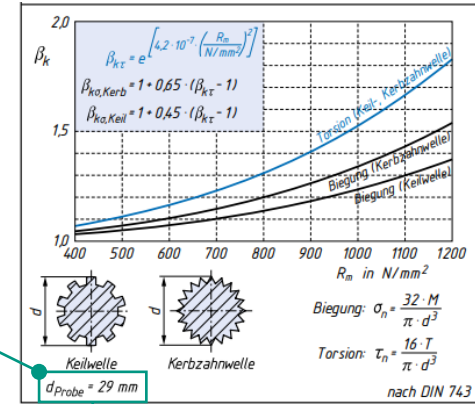
- Die Beanspruchbarkeit von realen Bauteilen weicht von den an gekerbten Proben ermittelten Beanspruchbarkeiten ab, da weitere Einflüsse auftreten:

- Oberfläche** (Rauheiten K_O , Verfestigungen K_V)
- Größe** (K_{1-3} z.B. Abweichung Durchmesser von Probe im Versuch)
- Temperatur**
- Korrosion**

- Analog zu α_K bzw. β_k werden diese Einflüsse über **weitere Einflussfaktoren** („Korrekturfaktoren“) beschrieben

- Anschließend werden alle Einflussfaktoren zu einem **Gesamteinflussfaktor** zusammengefasst, welcher dann mit dem zugehörigen **Werkstoffkennwert verrechnet** wird

$$K_\sigma = \left(\frac{\beta_k}{K_2} + \frac{1}{K_O} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} \cdot \frac{1}{K_1} \quad \sigma_{WK} = \frac{\sigma_W}{K_\sigma}$$



- Legende:**
- M [Nmm] ... Biegemoment
 - T [Nmm] ... Torsionsmoment
 - σ_n [MPa] ... Nennnormalspannung
 - τ_n [MPa] ... Nennschubspannung
 - $\beta_{k\sigma}$ [] ... Kerbwirkungszahl für Biegung
 - $\beta_{k\tau}$ [] ... Kerbwirkungszahl für Torsion
 - β_k [] ... Kerbwirkungszahl
 - d [mm] ... Durchmesser am Kerbgrund
 - d_{Probe} [mm] ... Probendurchmesser am Kerbgrund
 - R_m [MPa] ... Zugfestigkeit

Dimensionierung – Einflussfaktoren

Die Oberfläche eines Bauteils ist insbesondere für die dynamische Beanspruchbarkeit von großer Bedeutung

■ Statische Beanspruchung

- Einfluss der Mikroerhebungen auf **statische Festigkeitskennwerte** (Streckgrenze, Zugfestigkeit) **vernachlässigbar**

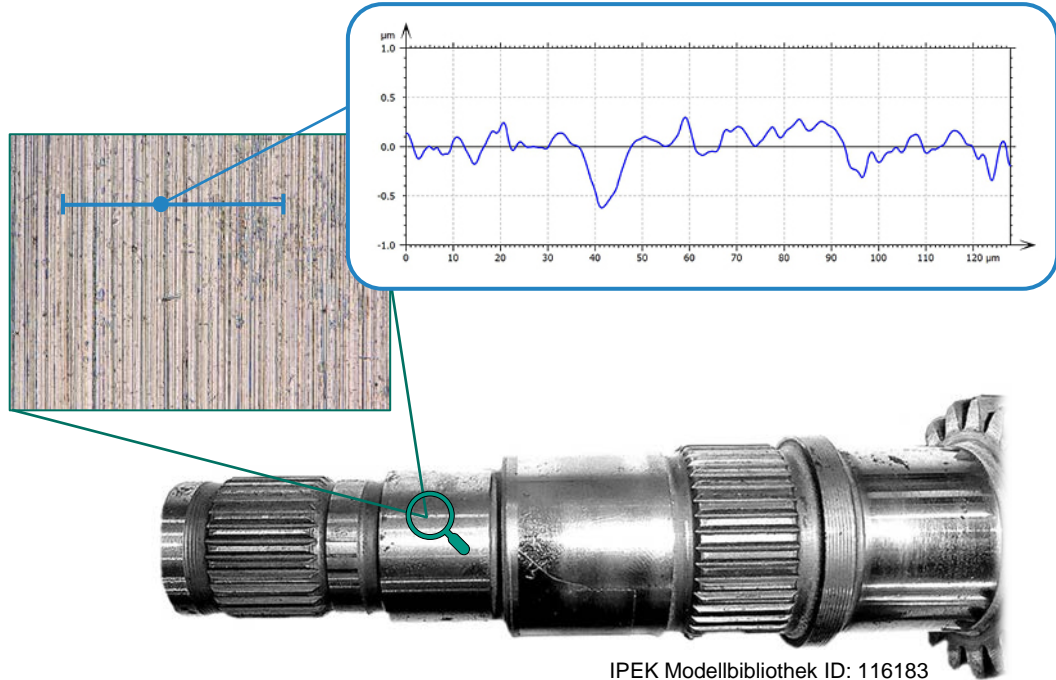
→ wird bei der Dimensionierung nicht berücksichtigt

■ Dynamische Beanspruchung

- Mikroerhebungen als **mikroskopische Kerben** als Ursache für Rissentstehung

→ Mikrorissbildung

→ **wichtiger Einflussfaktor**



IPEK Modellbibliothek ID: 116183

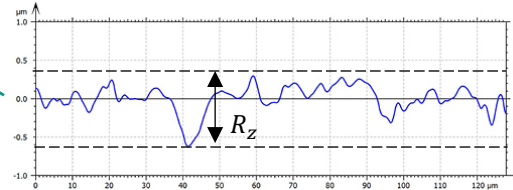
Dimensionierung – Einflussfaktoren

Raue Oberflächen reduzieren die Dauerfestigkeit, da mikroskopische Kerben zu lokalen Spannungsüberhöhungen auf der Mikroebene führen

- Der **Einflussfaktor der Oberflächenrauheit** berücksichtigt den **Einfluss der Rauheit** auf die örtlichen Spannungen und der daraus folgende **Reduktion der Dauerfestigkeit** des Bauteils

$$K_{0\sigma} = f(R_m, R_z) \leq 1$$

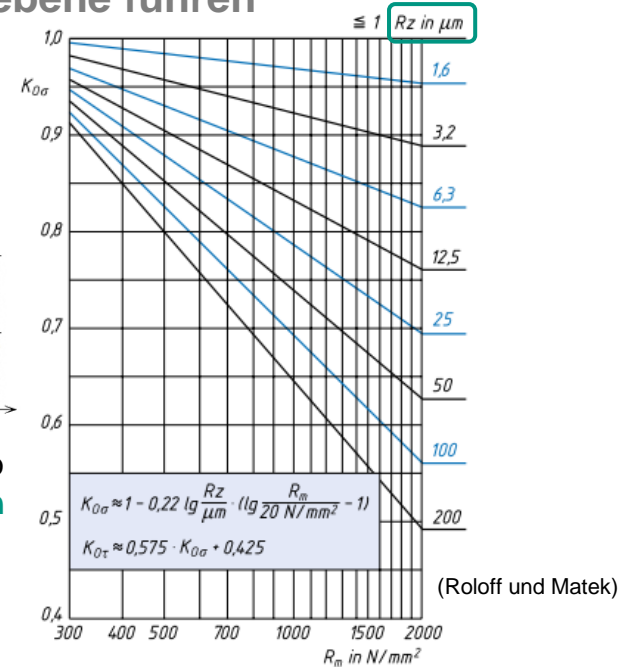
Einfluss der Rauheiten nimmt mit **zunehmender Festigkeit** des Werkstoffes zu



Je größer die **gemittelte Rautiefe R_z** , desto „größer“ sind die **mikroskopischen Kerben**

Kernaussage

Wenn ich hochfeste Werkstoffe verwende, dann muss ich auf eine gute Oberflächenqualität achten, weil Mikroerhebungen wie mikroskopische Kerben wirken und die lokalen Spannungsspitzen durch Fließvorgänge weniger stark abgebaut werden können.



Legende:

- $K_{0\sigma}$ [] ... Einflussfaktor der Oberflächenrauheit für Zug/Druck/Biegung
- $K_{0\tau}$ [] ... Einflussfaktor der Oberflächenrauheit für Torsion
- R_m [MPa] ... Zugfestigkeit
- R_z [μm] ... Gemittelte Rautiefe



Dimensionierung – Einflussfaktoren

Durch das Einbringen von Druckeigenspannungen kann die Dauerfestigkeit gesteigert werden

- Der Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung berücksichtigt den Einfluss (Eigenspannung, Härte) des **veränderten Oberflächenzustandes** durch das jeweilige technologische Verfahren auf die Dauerfestigkeit

$$K_V = f(d, \text{Verfahren}) \geq 1$$

- Durch **Härten** oder mechanische Verfahren wie z.B. dem **Kugelstrahlen** werden **Druckeigenspannungen** in die **Randzone** eingebracht
- Die Druckeigenspannungen wirken der **Ausbreitung** von **Rissen entgegen**
- Der Einflussfaktor K_V hat daher einen **positiven Einfluss auf die Dauerfestigkeit**

Kernaussage

Wenn Druckeigenspannungen in die Randzone eingebracht werden, dann steigt die Dauerfestigkeit, weil Druckeigenspannungen der Ausbreitung von Rissen entgegenwirken.

Annäherung von K_V auf Basis von Tabellenbüchern

Verfahren	Probe		$K_V^{(1)}$	Verfahren	Probe		$K_V^{(1)}$
	Art	d in mm			Art	d in mm	
Chemisch-thermische Verfahren				Mechanische Verfahren			
Nitrieren				Festwalzen			
Nitrierhärte tiefe:	u	8...25	1,15 (1,25)	u	7...25	1,2 (1,4)	
0,1 bis 0,4 mm		25...40	1,10 (1,15)		25...40	1,1 (1,25)	
Oberflächenhärte:	g	8...25	1,5 (2,5)	g	7...25	1,5 (2,2)	
700 bis 1000 HV10		25...40	1,2 (2,0)		25...40	1,3 (1,8)	
Einsatzhärten				Kugelstrahlen			
Einsatzhärte tiefe:	u	8...25	1,2 (2,1)	u	7...25	1,1 (1,3)	
0,2 bis 0,8 mm		25...40	1,1 (1,5)		25...40	1,1 (1,2)	
Oberflächenhärte:	g	8...25	1,5 (2,5)	g	7...25	1,4 (2,5)	
670 bis 750 HV10		25...40	1,2 (2,0)		25...40	1,1 (1,5)	
Karbonierhärten				Thermische Verfahren			
Härte tiefe:	u	8...25	1,1 (1,9)	Induktivhärten			
0,2 bis 0,4 mm		25...40	1 (1,4)	Flammhärten			
Oberflächenhärte:	g	8...25	1,4 (2,25)	u			
mind. 670 HV10		25...40	1,1 (1,8)	Härte tiefe:			
Alle Verfahren	u	>40	1,0	0,9 bis 1,5 mm			
				g			
				Oberflächenhärte:			
				51 bis 64 HRC			
				Alle Verfahren			
				g			
				40...250			
				>250			
				1,1			
				1,0			

¹⁾ Wert in () dient zur Orientierung und muss experimentell bestätigt werden.

Für ungekerbte Wellen ist bei Zug/Druck $K_V = 1$. Erfolgt die Berechnung über Stützzahlen, die für verfestigte Werkstoffe gelten oder mit experimentell bestimmten Kerbwirkungszahlen, gültig für den verfestigten Zustand, ist ebenfalls $K_V = 1$ zu setzen.

u ungekerbt g gekerbt

(Roloff und Matek, nach FKM Richtlinie)

K_V [] : Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung



Dimensionierung – Einflussfaktoren

Welchen Einfluss hat die Größe eines Bauteils auf die erreichbare Dauerfestigkeit?



- Hierbei sind verschiedene Ursachen zu nennen, welche mithilfe der Einflussfaktoren K_{1-3} (DIN 743-2) berücksichtigt werden können:
 - Bei größeren Bauteilen nimmt der Einfluss durch das **Herstellungsverfahren** zu (K_1)
 - Bei größerem Durchmesser steigen die Anteile an **Zugbeanspruchung** im **Randbereich** (K_2)
 - Bei größeren Bauteilen nimmt die **Kerbwirkung** zu (K_3)

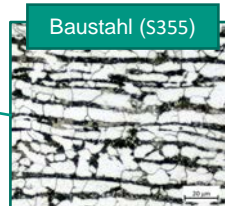
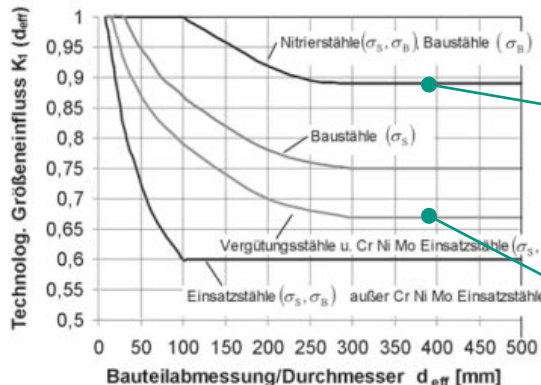
Dimensionierung – Einflussfaktoren

Bei größeren Bauteilen nimmt der Einfluss durch das Herstellungsverfahren zu

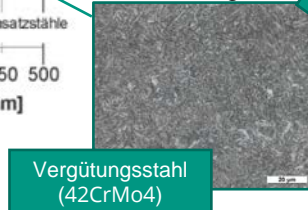
■ Technologischer Größeneinflussfaktor K_1

- Berücksichtigt näherungsweise, dass die **erreichbare Härte** (damit auch Streckgrenze und Ermüdungsfestigkeit) beim Vergüten bzw. die Kernhärte beim Einsatzhärten **mit steigendem Durchmesser abnimmt**
- Weiter steigt bei größerem Bauteilvolumen die **Wahrscheinlichkeit**, dass **Materialfehler** enthalten sind (z.B. Hohlräume)

Antriebswelle Schiffbau



Unterschied Gefüge



Vergütungsstahl (42CrMo4)

Feines Gefüge im Inneren eines großen Bauteils nicht mehr möglich, da die Wärme beim Abschrecken hier nicht schnell genug abgeführt werden kann

Kernaussage

Die Verwendung hochfester Stähle bei großen Bauteilen führt aufgrund des Herstellungsverfahrens zu einer kleineren Festigkeit im Bauteilinneren im Vergleich zu der Festigkeit im Randbereich. Aufgrund der Unsicherheit über Fehlstellen, ist das Einbeziehen von Erfahrungswerten sinnvoll.

Legende:

K_1 [] ... Technologischer Größeneinflussfaktor

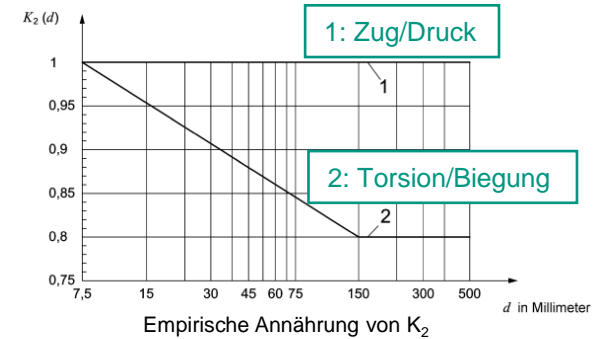
d_{eff} [mm] ... Effektiver Durchmesser aus Wärmebehandlung

Dimensionierung – Einflussfaktoren

Bei größerem Durchmesser steigen die Anteile an Zugbeanspruchung im Randbereich

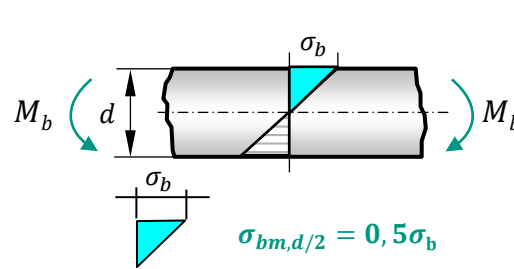
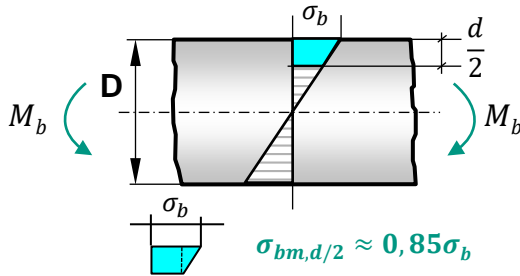
■ Geometrischer Größeneinflussfaktor K_2

- Berücksichtigt, dass bei größer werdendem Durchmesser oder Dicken die **Biegewechselfestigkeit in die Zug/Druckwechselfestigkeit übergeht** und analog auch die Torsionswechselfestigkeit sinkt.
- Der Randbereich wird bei größerem Durchmesser zunehmend auf Zug/Druck beansprucht

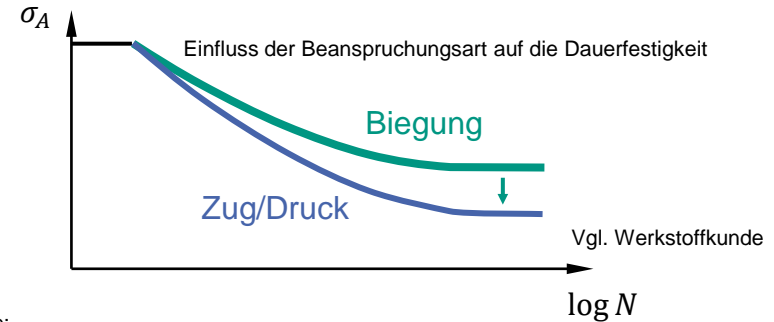


Durchmesser D

Durchmesser $d < D$



→ Zuganteile im Randbereich



Legende:

- $K_2 []$... Geometrischer Größeneinflussfaktor
- $\sigma_b [MPa]$... Maximale Normalspannung am Rand infolge Biegung
- $\sigma_{bm,d/2} [MPa]$... Mittlere Normalspannung in einer Randschicht mit Dicke $d/2$ infolge Biegung
- $\sigma_A [MPa]$... Spannungsamplitude
- $N []$... Lastspielzahl

Dimensionierung – Einflussfaktoren

Bei größeren Bauteilen nimmt die Kerbwirkung zu

■ Geometrischer Größeneinflussfaktor K_3

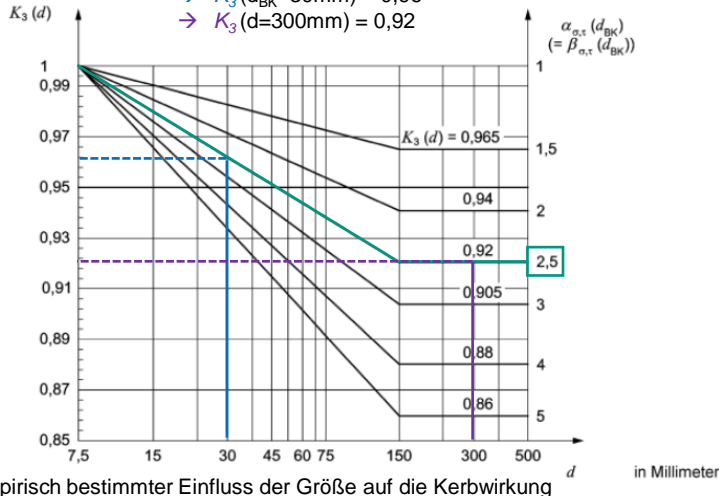
- Berücksichtigt die **Änderung der Kerbwirkung**, wenn die **Bauteilabmessungen von den Probenabmessungen abweichen** und sämtliche Abmessungen im gleichen Maßstab geändert wurden
- Wird nur berücksichtigt, wenn die Kerbwirkungszahl $\beta_k (d_{BK})$ **experimentell** bestimmt wurde

Beispiel:

→ $\beta_k (d_{BK}=30\text{mm}) = 2,5$

→ $K_3 (d_{BK}=30\text{mm}) = 0,96$

→ $K_3 (d=300\text{mm}) = 0,92$



$$\beta_{k\sigma} = \beta_{k\sigma}(d_{BK}) \cdot \frac{K_3(d_{BK})}{K_3(d)}$$

≥ 1 für $d_{BK} > d$ → Korrektur der Kerbwirkung nach oben



Beispiel Kerbwirkungszahl Keilwelle

- Experimentell ermitteltes $\beta_k = 2,5$ mit gleichem Material und Durchmesser $d_{BK} = 30\text{mm}$
- Durchmesser $d = 300\text{mm} > d_{BK}$
- Korrektur von β_k auf $\beta_k = 2,61$

Legende:

$K_3 []$... Technologischer Größeneinflussfaktor

$d [\text{mm}]$... Durchmesser

$\beta_k []$... Kerbwirkungszahl

Dimensionierung – Einflussfaktoren

Bei hohen Temperaturen treten sich überlagernde Phänomene auf, welche die Beanspruchbarkeit im Allgemeinen reduzieren

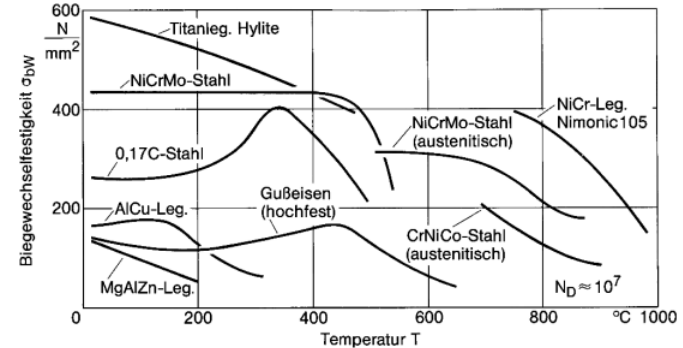
- Festigkeiten sind **temperaturabhängig**
- Kennwerte aus Standardversuchen gelten nur für Raumtemperatur bzw. in bestimmten Temperaturbereichen

Statische Beanspruchungen

- Festigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab
 - ➔ **Warmfestigkeit**
- Beim Überschreiten einer kritischen Übergangstemperatur tritt **Kriechen** auf
 - ➔ **Zeitstandfestigkeit**

Dynamische Beanspruchungen

- Dauerfestigkeit nimmt i. A. mit steigender Temperatur ab
- Bei sehr hohen Temperaturen kommt es zur **Überlagerung** von **Ermüdungs-** und **Kriechprozessen**



(Allen u. Forrest)

Kernaussage

Bei hohen Temperaturen sinkt im Allgemeinen die Beanspruchbarkeit und es treten mehrere, sich teilweise überlagernde Phänomene auf.
Zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit in der Dimensionierung sind daher Erfahrungswerte zu nutzen.



Dimensionierung – Einflussfaktoren

Unter Einfluss von Korrosion kann keine Dauerfestigkeit erreicht werden, weil korrodierte Oberflächen zur Rissbildung neigen

Korrosive Umgebung (z.B. Meerwasser) hat großen **Einfluss auf dynamische Festigkeitskennwerte:**

- Begünstigung der Ermüdungsmechanismen
- Veränderung der Oberfläche (Narben, Mikrorisse)
- Beschleunigung des Risswachstums (Korrosionsermüdung)



Beispiel Reibkorrosion

- Mikrogleitbewegung zwischen zwei aufeinandergepressten Flächen
- Bildung von Reaktionsschichten
- Entstehung von Passungsrost
- Kritisch bei dynamischer Belastung

Schwingbruch an Antriebswelle ausgelöst durch Reibkorrosion

Kernaussage

Beim Auftreten von Korrosion ist im Allgemeinen keine Dauerfestigkeit erreichbar.
Die Wahl der richtigen Passung und ein gutes Dichtungskonzept ist daher von hoher Bedeutung.



Dimensionierung – Einflussfaktoren

Alle Einflussfaktoren werden zu einem Gesamtfaktor zusammengefasst und mit der Dauerfestigkeit verrechnet

- Kerbwirkungszahl, sowie Einflussfaktoren von Größe und Oberfläche werden zu einem **Gesamteinflussfaktor** zusammengefasst

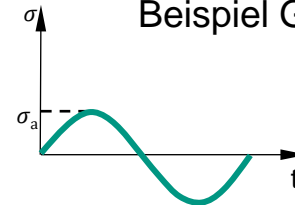
$$K_{\sigma} = \left(\frac{\beta_{k\sigma}}{K_2} + \frac{1}{K_{O\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} \cdot \frac{1}{K_1}$$

Gleichung auch als „Stellhebel“ nutzen

- z.B. Faktor für Oberflächenverfestigung nahe 1 → Verfahren ändern?
- Handlungsstrategien ableiten um K_{σ} klein zu halten

- Berechnen der Auswirkung auf die Dauerfestigkeit

$$\sigma_{bWK} = \frac{\sigma_{bW}}{K_{\sigma}}$$



Beispiel Getriebewelle **Umlaufbiegung**



Kernaussage

Weitere Einflüsse (z.B. Temperaturabhängigkeit, Korrosion) werden nach der DIN 743 zunächst nicht berücksichtigt.

Für diese Einflüsse müssen Erfahrungswerte (z.B. aus der aktuellen Produktgeneration) oder andere Dimensionierungswerkzeuge (z.B. Versuche mit Prototypen) verwendet werden.

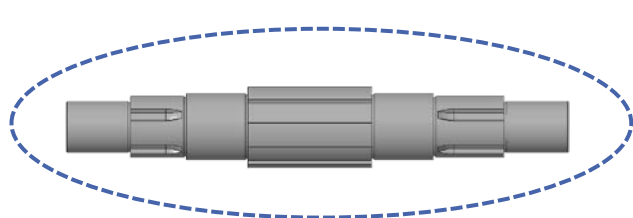
Legende:

- K_{σ} [] ... Gesamteinflussfaktor
- K_1 [] ... Technologischer Größeneinflussfaktor
- K_2 [] ... Geometrischer (spannungsmech.) Größeneinflussfaktor
- $K_{O\sigma}$ [] ... Einflussfaktor der Oberflächenrauheit für Zug/Druck/Biegung
- $\beta_{k\sigma}$ [] ... Kerbwirkungszahl für Biegung
- σ_{bW} [MPa] ... Biegewechselfestigkeit
- σ_{bWK} [MPa] ... Reduzierte Biegewechselfestigkeit
- t [s] ... Zeit
- σ_a [MPa] ... Spannungsamplitude infolge Umlaufbiegung



Maschinenkonstruktionslehre C - Dimensionierung III

Inhaltsverzeichnis



Lernziele & Einleitung



Kerben



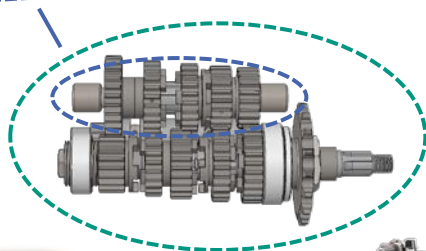
Einflussfaktoren



Kombinierte Lastfälle



Zusammenfassung

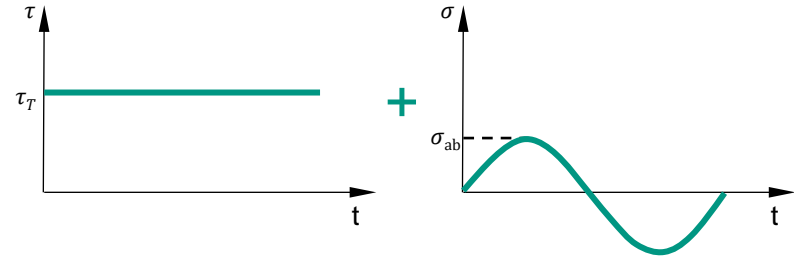
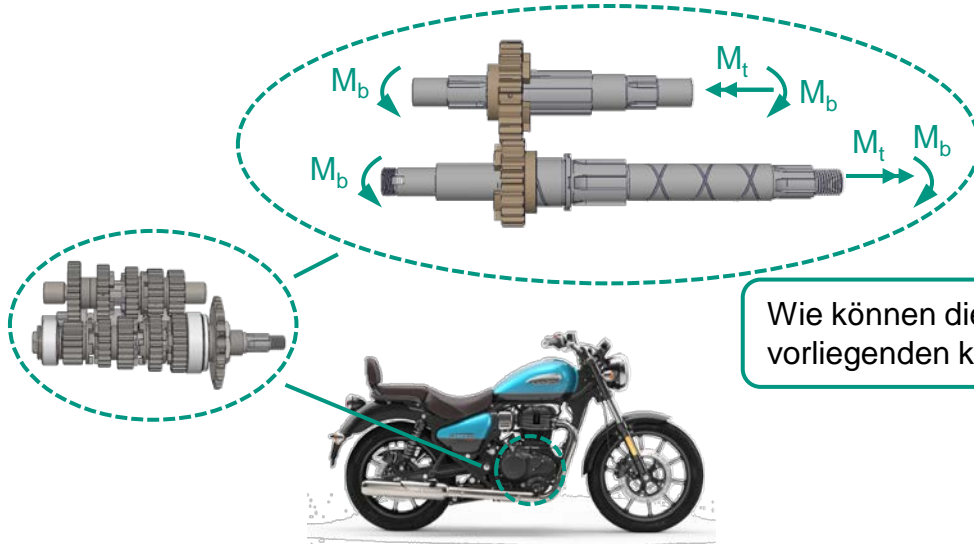


Dimensionierung – Kombinierte Lastfälle

Kombinierter Lastfall am Beispiel Getriebewellen

Analyse Lastfall am Beispiel Getriebewellen (Annahme stationärer Zustand)

- Kombinierte Belastung aus
 - **Konstantem Torsionsmoment** (statisch) und
 - **Umlaufbiegung** (Biegung wechselt bei jedem Umlauf das Vorzeichen) (dynamisch)



Wie können die Wellen unter Berücksichtigung des vorliegenden kombinierten Lastfalls dimensioniert werden?

Legende:

M_b [Nmm] ... Biegemoment

M_t [Nmm] ... Torsionsmoment

σ_{ab} [MPa] ... Spannungsamplitude infolge Umlaufbiegung

τ_T [MPa] ... Schubspannung infolge Torsion

t [s] ... Zeit

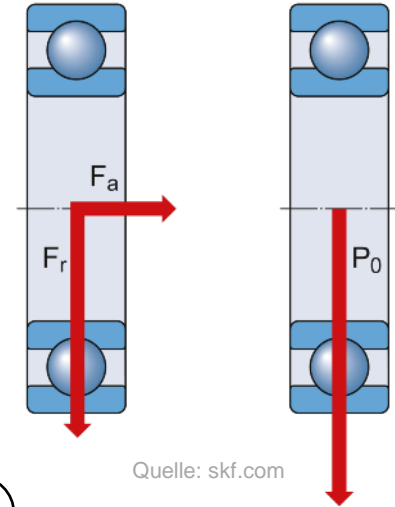


Dimensionierung – Kombinierte Lastfälle

Rückblick Lagerdimensionierung (MKL A)

- Vergleich Lagerdimensionierung bei statischer Last
 - **Kombination** aus **radialer** und **axialer Belastung**
- Verwendeter Ansatz:
 - Berechnung einer **äquivalenten statische Belastung** P_0

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a$$



P_0 :	Äquivalente statische Lagerbelastung
F_r :	Radialkraft → Maximalwert aus Anwendungsfall
F_a :	Axialkraft → Maximalwert aus Anwendungsfall
X_0 :	Radialfaktor → abhängig von Bauart und Baugröße, aus Lagerkatalogen
Y_0 :	Axialfaktor → abhängig von Bauart und Baugröße, aus Lagerkatalogen

Dimensionierung – Kombinierte Lastfälle

Wie können Wellen gegen kombinierte Belastungen dimensioniert werden?

- Verwendung des **Ellipsenverfahrens** (Analogie zur Ellipsenform der Gestaltänderungshypothese)
- Jede Belastung wird auf den **maximal zulässigen Wert** der **reinen Belastungsart** bezogen

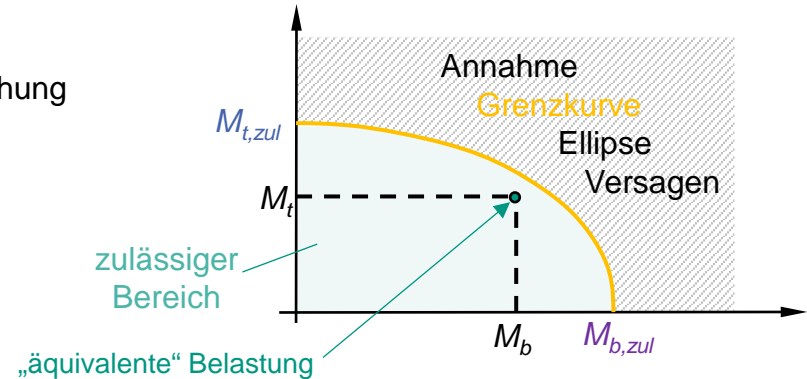
■ Für das **Beispiel Getriebewelle**

- **Torsion** (statisch) → Statischer Grenzwert
- **Biegung** (wechselnd) → Grenzwert für wechselnde Beanspruchung

$$\frac{B}{R} \triangleq \left(\frac{M_t}{M_{t,zul}} \right)^2 + \left(\frac{M_b}{M_{b,zul}} \right)^2 \leq 1$$

$M_{t,zul}$ → Grenzwert für reinen Lastfall Torsion

$M_{b,zul}$ → Grenzwert für reinen Lastfall Umlaufbiegung



Kernaussage

Durch Verwendung des Ellipsenverfahrens kann eine Dimensionierung gegen kombinierte Belastungen, wie z.B. hier aus umlaufender Biegung und Torsion, erfolgen.

Legende:

M_b [Nmm] ... Biegemoment

M_t [Nmm] ... Torsionsmoment

$M_{b,zul}$ [Nmm] ... Grenzwert für reinen Lastfall Umlaufbiegung

$M_{t,zul}$ [Nmm] ... Grenzwert für reinen Lastfall Torsion



Dimensionierung – Kombinierte Lastfälle

Beispiel: Berechnung der Grenzwerte

Zulässige Belastungen der Getriebewelle (stationär)

$M_t = \text{konstant}, \quad M_b = \text{wechselnd}$

$$M_{t,zul} = \tau_{zul} \cdot W_t = \left[\frac{\delta_{k0,2} \cdot \tau_F}{\alpha_{kt} \cdot S_F} \right] \cdot W_t \quad \tau_F = \frac{R_{p0,2}}{\sqrt{3}}$$

Statische Grenzwertberechnung → Ausnutzen der teilplastischen Auslegung

$$M_{b,zul} = \sigma_{b,zul} \cdot W_b = \left[\frac{\sigma_{bw}}{K_\sigma \cdot S_D} \right] \cdot W_b$$

Dynamische Grenzwertberechnung
→ Berücksichtigung von Einflüssen
mithilfe des Gesamteinflussfaktors

- Detailliertere Betrachtung der Rechnung erfolgt in der Übung
- Für weitere, beliebige Lastfallverläufe und –Kombinationen
→ Spezialliteratur oder CAE (s. nächste Vorlesung)

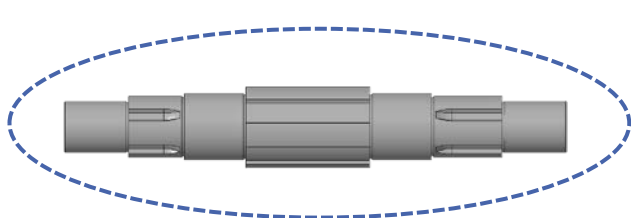
Legende:

M_b [Nmm] ... Biegemoment
 M_t [Nmm] ... Torsionsmoment
 $M_{b,zul}$ [Nmm] ... Grenzwert für reinen Lastfall Umlaufbiegung
 $M_{t,zul}$ [Nmm] ... Grenzwert für reinen Lastfall Torsion
 $\sigma_{b,zul}$ [MPa] ... Max. zulässig Normalspannung infolge Biegung
 τ_{zul} [MPa] ... Max. zulässig Schubspannung infolge Torsion
 W_t [mm³] ... Widerstandsmoment gegen Torsion
 W_b [mm³] ... Widerstandsmoment gegen Biegung
 σ_{bw} [MPa] ... Biegewechselfestigkeit
 τ_F [MPa] ... Schubdehngrenze
 α_{kt} [] ... Kerbformzahl für Torsion
 K_σ [] ... Gesamteinflussfaktor
 $R_{p0,2}$ [MPa] ... 0,2-%-Dehngrenze
 $\delta_{k0,2}$ [] ... Kerbformdehngrenzenverhältnis
 S_D [] ... Sicherheit gegen Schwingbruch
 S_F [] ... Sicherheit gegen Fließen



Maschinenkonstruktionslehre C - Dimensionierung III

Inhaltsverzeichnis



Lernziele & Einleitung



Kerben



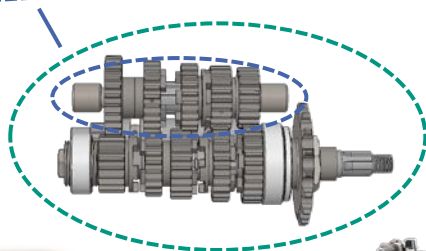
Einflussfaktoren



Kombinierte Lastfälle



Zusammenfassung



Lernziele der Vorlesung

Dimensionierung III – Dimensionieren mit Einflussfaktoren

Problem

Das reale Bauteil besitzt häufig keine einfache Geometrie und ist unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt. Wie können wir das bei der Dimensionierung in frühen Phasen der Produktentwicklung berücksichtigen?

Ziele

- Den Einfluss der **Kerbform** und der **Belastungsart** auf die **Spannungsüberhöhung** infolge der Kerbe erklären können. F12-F13
- Die Auswirkung einer **teilplastischen Auslegung** bei duktilen Werkstoffen auf die **Kerbwirkung** erklären können. F15-F18
- Den Einfluss von **Kerben** bei einer **dynamischer Beanspruchung** erklären können. F19-F20
- Die Anteile des **Gesamteinflussfaktors** zur Berücksichtigung weiterer Einflüsse nennen können. F24, F34
- Den Einfluss der **Oberflächenrauheit**, der **Oberflächenverfestigung** sowie der **Größe** eines Bauteils auf die **Dauerfestigkeit** erklären können. F26-F31
- Das **Ellipsenverfahren** für die Dimensionierung bei **kombinierten Lastfällen** verstehen und anwenden können. F38-F39

Fazit

Zur Berücksichtigung der am realen Bauteil auftretenden Einflüsse kann für die Dimensionierung in frühen Phasen der Produktentwicklung weiterhin das Nennspannungskonzept verwendet werden. Dabei wird die Kerbwirkung, die **Oberflächenrauheit** und **Oberflächenverfestigung** sowie **größenabhängige** Einflüsse über Korrekturfaktoren berücksichtigt, **welche die Beanspruchung oder die Beanspruchbarkeit des idealen Bauteils korrigieren.**