
KONSTRUKTION

Methodisches Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. H. Gruss

Gliederung

1. Einführung

2. Konstruktionsprinzipien
 - Prinzipien der kraftflussgerechten Gestaltung
 - Prinzipien der Aufgabenteilung
 - Prinzip der Selbsthilfe
 - Selbstschützende Lösungen
 - Prinzip der Stabilität und Bistabilität

3. Sichere und zuverlässige Gestaltung konstruktiver Systeme
 - Technische Bewertung der Begriffe Sicherheit und Risiko
 - Störungs- und Fehlererkennung, FTA und FMEA
 - Prinzipien der sicherheitsgerechten Konstruktion

4. Gestaltungsregeln
 - Grundsätzliches zu den Arbeitsschritten des Entwerfens und Gestaltens
 - Die Grundregeln
 - Ausdehnungsgerechtes Konstruieren
 - Kriech- und relaxationsgerechtes Konstruieren
 - Korrosionsgerechtes Gestalten

1. Einführung

- In dieser Vorlesung steht die Analyse technischer Systeme hinsichtlich ihrer spezifischen Wirkungsweisen und Schnittstellen zum Umfeld im Mittelpunkt. Aus den resultierenden Zusammenhängen und auf Basis natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlagenfächer werden im Folgenden Regeln zur Gestaltung von Bauteilen und Baugruppen abgeleitet.

Wissensgebiete

**Bau und Betrieb von Maschinen, Anlagen,
Komponenten** mit den Tätigkeiten
Entwicklung und Konstruktion

Mathematik

Mechanik

Darstellende
Geometrie

Thermodynamik

Strömungslehre

Werkstoffkunde

Fertigungstechnik

Maschinenzeichnen

...

- Aus den Anforderungen an die Entwicklung von Produkten ergeben sich die Aufgaben für die Lehre

Objektbezogene Lehre, die von bekannten Konstruktionen und Funktionen ausgeht.

Analyse und Optimierung technischer Systeme hinsichtlich ihres Aufbaus und Wirkungsweise

Vermittelt Methoden zum Erarbeiten von Lösungen für technische Systeme, die die definierten Funktionen erfüllen.

- Das Wissen um konstruktive Strukturen wurden im Laufe der Zeit oft branchenspezifisch erworben und innerhalb der Unternehmen als spezifisches Know-how gespeichert. Die Aufgabe der Konstruktionswissenschaft besteht somit darin, dieses Wissen branchenunabhängig und methodisch aufzubereiten, d.h.
 - Finden übergeordneter Prinzipien, woraus konstruktive Regeln abgeleitet werden können.

Beispiel: thermische Beanspruchung

- Übergeordnete Prinzipien zur zweckmäßigen Gestaltung sind in der Fachliteratur mehrfach formuliert worden. So zum Beispiel die Aufstellung sogenannter Minimierungsprinzipien bzgl. Raumbedarf, Gewicht, Verluste usw. oder die Prinzipien des Leichtbaus und der gleichen Wandstärke.

Problem:

→ Es können Prinzipien nicht gleichzeitig in einer Lösung verwirklicht werden

→ Identifizieren des Wesenskerns einer Aufgabenstellung durch Analyse der Wirkungsweise und Aufbau des technischen Systems sowie der zulässigen Randbedingungen (Kosten, Gewicht, Material, Fertigung, Montage, Ergonomie usw.)

- Pahl/Beitz unterscheiden Wirkprinzipien, Gestaltungsprinzipien und Gestaltungsrichtlinien. Eine solche Ordnung ist jedoch auch nur eine Hilfe zur Lösung bestimmter Funktionen oder dient der Einhaltung gegebener Randbedingungen.

Strategien für den Entwurf konstruktiver Systeme

- Hierunter fallen alle Überlegungen, die das Gesamtsystem betreffen, wie:
 - Funktionen
 - Störgrößen
 - Randbedingungen
 - Teillösungen
- Die vorwiegende Anwendung liegt im Bereich der Konzept- und Entwurfsphase.

- Thematisch beinhaltet dieser Begriff folgende Schwerpunkte:
 - Kostenbewusstes Konstruieren
 - Baureihen und Baukastensysteme
 - Prinzipien der Kraftleitung
 - Prinzipien der Aufgabenteilung
 - Prinzipien der Selbsthilfe
 - Sichere und zuverlässige Gestaltung konstruktiver Systeme
 - Überwinden von Fehlern und Störgrößen

Regeln zur Gestaltung von Bauteilen und Baugruppen

- Sie dienen der Funktionsoptimierung unter dem Einfluss der Randbedingungen (Reskriktionen) wie Werkstoff, Fertigung, Betriebsbedingungen usw. und kommen hauptsächlich in der Detaillierungsphase bei der Gestaltung von Einzelteilen zur Anwendung.

- Thematisch beinhalten diese Regeln folgende Schwerpunkte:
 - einfach, eindeutig, sicher
 - normgerecht
 - fertigungs- und (de)montagegerecht
 - kraft- und verformungsgerecht
 - ausdehnungs-, kriech- und relaxationsgerecht
 - korrosionsgerecht

Konstruktion der maschinenseitigen Schnittstellen zu Mensch und Umwelt

- Während des gesamten Konstruktionsentwicklungsprozesses erfolgt hierbei die Analyse des gesamten konstruktiven Systems mit Fokus auf die Kontaktbereiche zu Mensch und Umwelt.
- Folgende Themen sind diesem Bereich zuzuordnen:
 - sicherheitsgerechtes Konstruieren (Arbeitssicherheit)
 - ergonomisches Konstruieren
 - Konstruktion lärmarmen Maschinen
 - umweltgerechte Konstruktion

- Von diesen Konstruktionsprinzipien und Gestaltungsregeln sind aufgabenspezifische Optimierungsprinzipien nicht erfasst. Optimierungsziele können sein:
 - Massenabstimmung chemischer Apparate zur Unterstützung der Reaktionsführung
 - Instandhaltungsstrategien zum zeitabgestimmten Austausch von Verschleißteilen
- (Structural Health Monitoring)
- Schwingungs- und Dämpfungsauslegung von Maschinenstrukturen

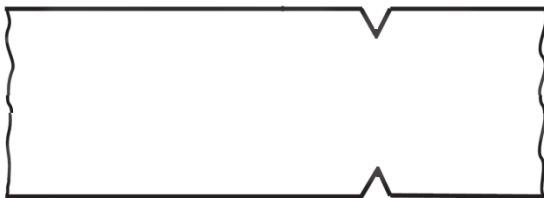
2 Konstruktionsprinzipien

2.1 Prinzipien der kraftflussgerechten Gestaltung

- In nahezu allen Konstruktionen werden Kräfte und Wirkbewegungen geleitet. Eine immer wiederkehrende Teilfunktion ist dabei die Aufnahme und Leitung von Kraftgrößen. Der „Kraftfluss“ ist somit ein wichtiges Werkzeug zur konstruktiven Beurteilung einer Lösung in Bezug auf die:
 - Beanspruchung
 - Verformung

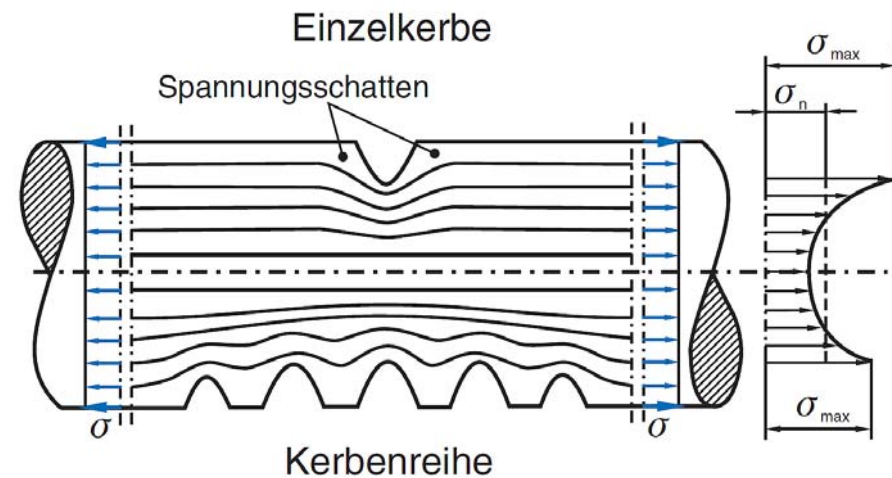
- Hierbei ist immer das bereits in den Grundlagenfächern Technische Mechanik und Maschinenelemente behandelte Zusammenspiel:

- Bei der Untersuchung der Durchleitung der Kraftgrößen und des Verformungsverhaltens ist der Kraftfluss eine gute Hilfsvorstellung. Man stelle sich vor, dass die Kraftgrößen wie eine Flüssigkeit durch ein System strömt. Bei Querschnittsänderungen, Umlenkungen usw. verändert sich die Strömungsgeschwindigkeit, bei scharfen Kanten neigt die „Flüssigkeit“ zu Turbulenzen – beides wird als Spannungskonzentration interpretiert. Die Kraftvorstellung hilft sowohl der Analyse des gesamten Produktes als auch der Aufdeckung von Spannungsüberhöhungen in Bauteilen infolge Kerbwirkung, welche durch Querschnittsübergangsanpassungen (Entlastungskerbenn, Baud-Profil) herabgesetzt werden kann.



- Beispiel: Entlastungskerben

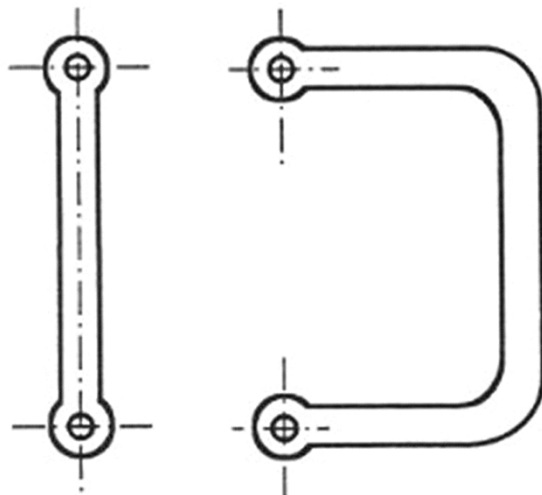
Tragfähigkeitssteigerungen lassen sich durch Anwendung von Entlastungskerben erzielen, wobei die Nuttiefe der Entlastungskerben von großem Einfluss sind.



- Ein Kraftfluss ist immer geschlossen. Dabei bleiben Massekräfte, Eigengewicht, Fliehkräfte unberücksichtigt.
- In einem Kraftfluss-Kreislauf können sich die Beanspruchungsarten ändern – aus Zug/Druck wird bei Umlenkung Biegung/Torsion
- Der Kraftfluss folgt dem Minimalprinzip der Arbeit, d.h., er sucht sich den kürzesten Weg. Dabei kann er konstruktiv unterstützt werden.

2.1.1 Prinzipien der direkten und kurzen Kraftleitung

- Ist eine Kraft oder ein Moment von einer Seite zur anderen bei möglichst kleiner Verformung zu leiten, dann ist der direkte und kürzeste Kraftleitungsweg der zweckmäßigste.



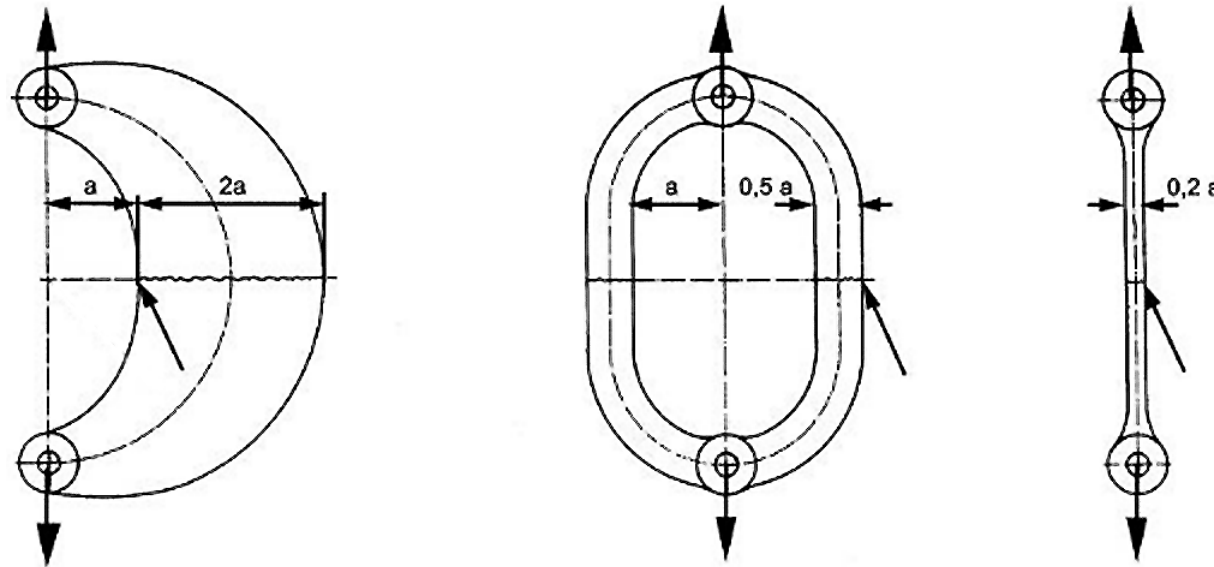
Stab:

Schnittgröße:

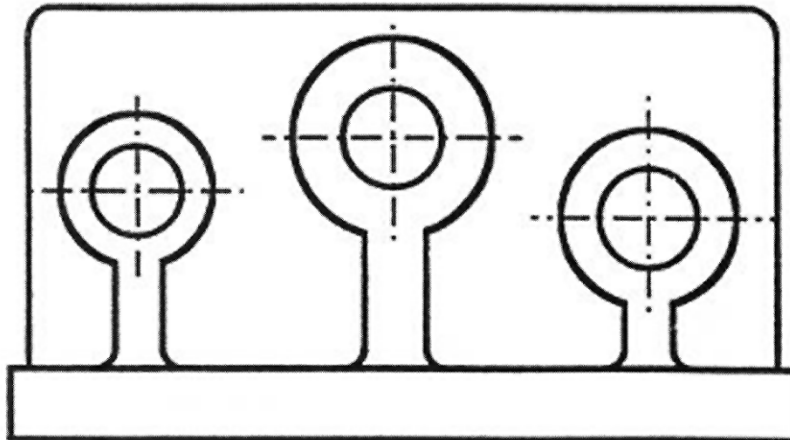
Bügel:

Schnittgrößen:

- Die Folgen für die Dimensionierung sind dem folgendem Bild zu entnehmen. Bei einer Kraftumlenkung erfordert die Struktur entsprechend gleich zulässiger Beanspruchung einen wesentlich größeren Materialaufwand. Bzgl. der Verformungen verhalten sich die beiden gezeigten Konstruktionen mit Biegebeanspruchung immer noch weicher als der Zugstab.

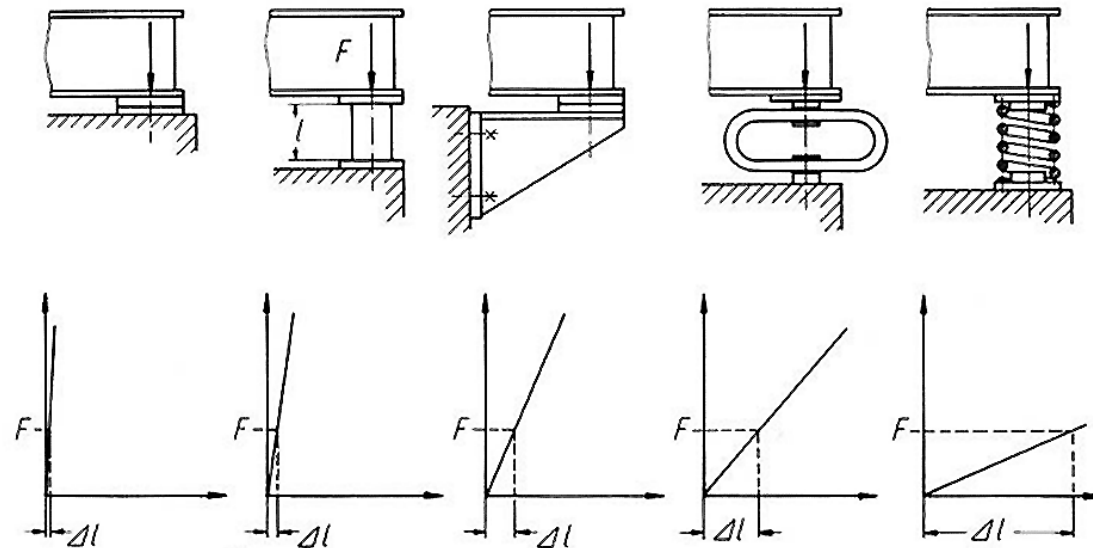


- Hieraus lassen sich je nach Aufgabe zwei unterschiedliche Bauweisen klassifizieren:
 1. Direkte und kurze Kraftleitung führt zu:

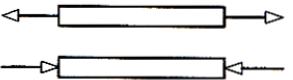
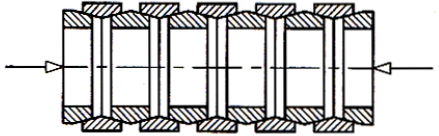
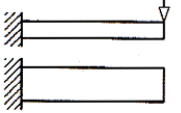
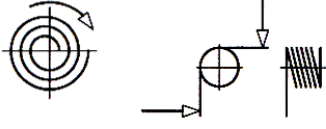

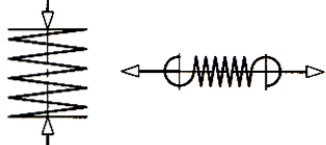
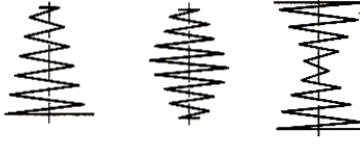


2. Große Kraftflusswege unter Biege- und Torsionsbeanspruchung führen zu:

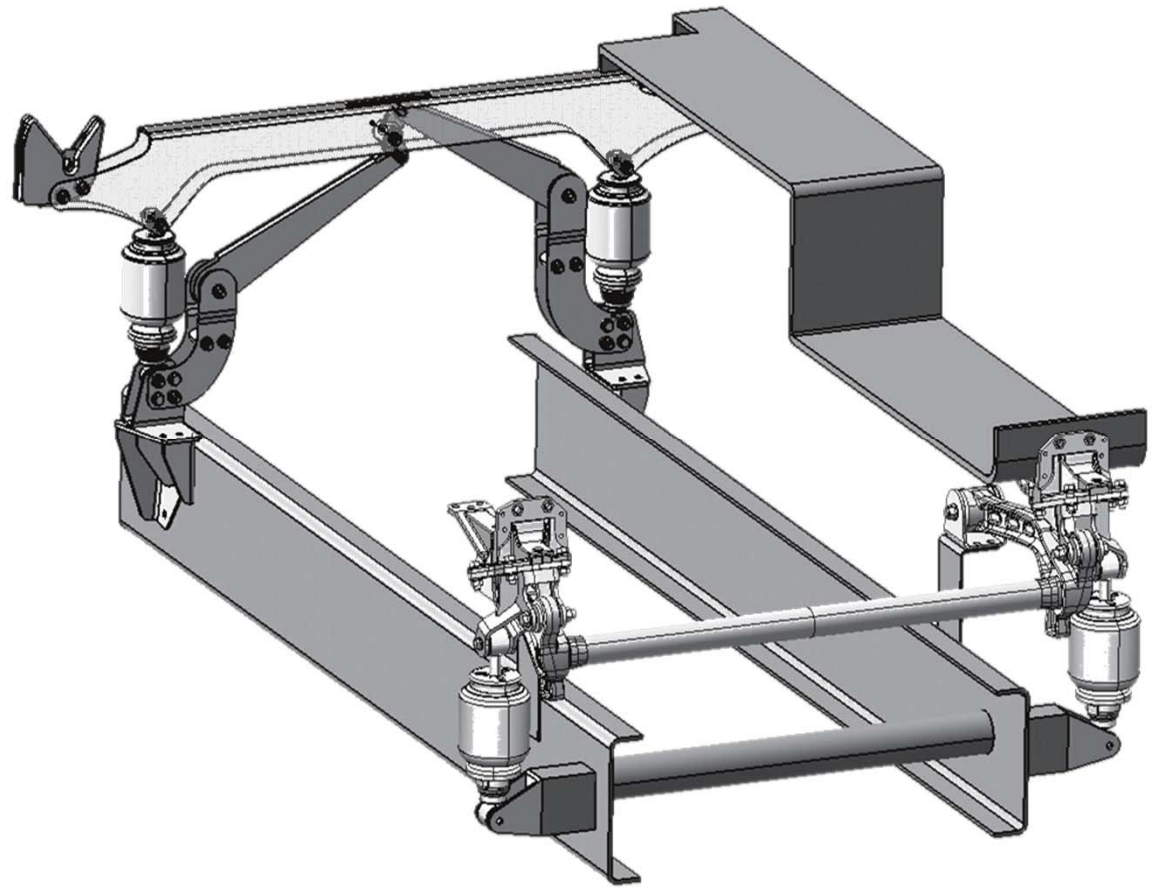
- Bezug nehmend auf den direkten und indirekten Kraftfluss, zeigt das Beispiel einer Abstützung auf einem Fundament den Einfluss der konstruktiven Gestaltung auf die Federsteifigkeit. Dies hat Folgen für die Eigenfrequenzen und Nachgiebigkeit des Systems bei einer zusätzlichen Kraftbeaufschlagung.



Beispiel: Federn

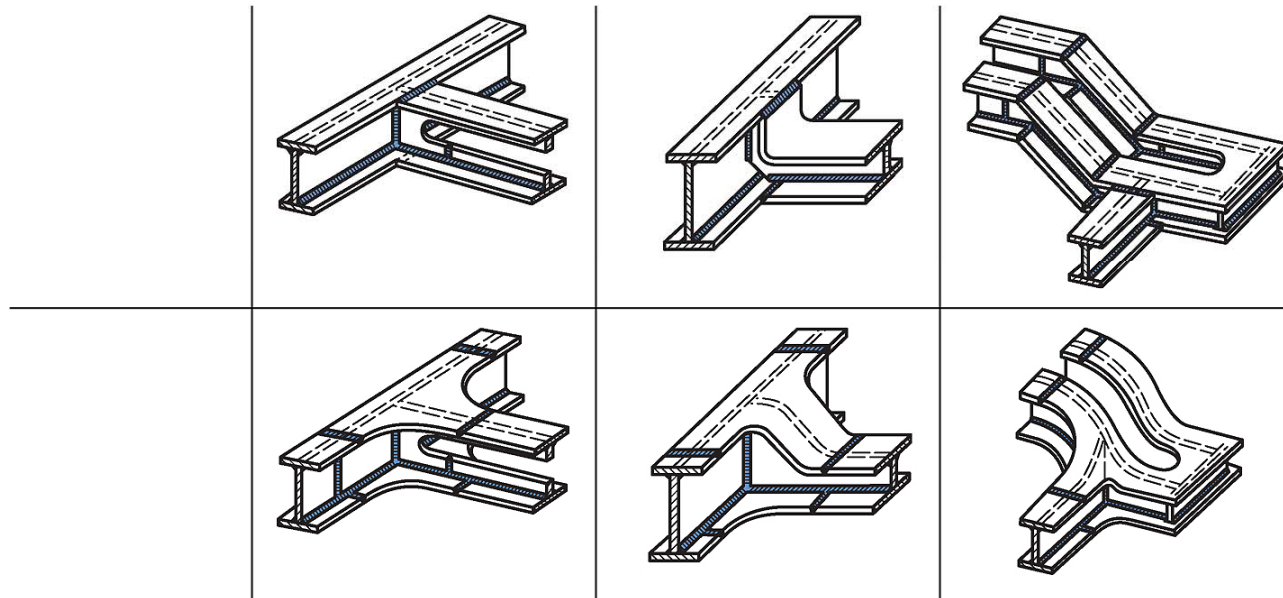
		Metallfedern		
Federwerkstoffbeanspruchung	Zug	Zug- und Druckstabfedern 		Ringfeder 
	Druck	gerade Formen	gewundene Formen	Scheiben- und Sonderformen
		Biegung	Blattfeder 	Spiralfeder Drehfeder 
Verdrehung	Drehstabfeder 	zylindr. Schraubenfeder  Druckfeder Zugfeder	nichtzyl. Schraubenfeder  Kegelstumpf- Tonnen- Taillenfeder	

Einteilung von mechanischen Federn nach Beanspruchung



Fahrerhauslagerung

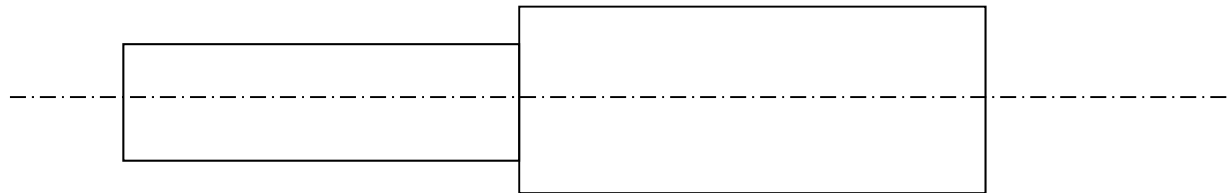
Beispiel: Schweißkonstruktion



Geschweißte Anschlüsse einer Trägerkonstruktion

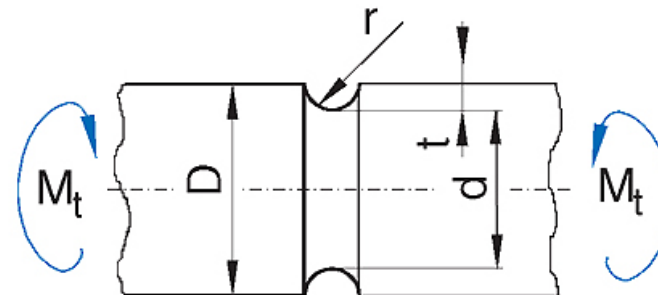
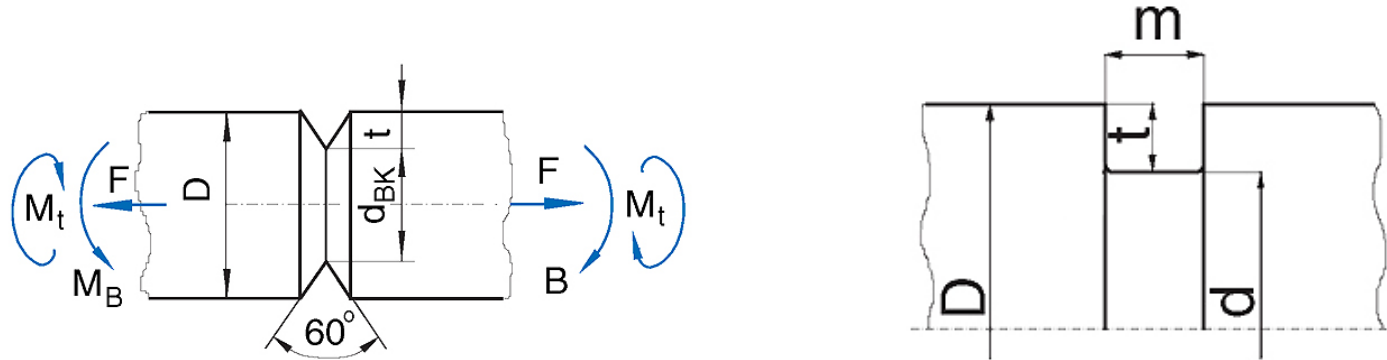
2.1.2 Prinzipien der abgestimmten Verformung

- Aus der Betrachtung des Kraftflusses kann die Entstehung der Kerbwirkung abgeleitet werden. Hauptursache der Kerbwirkung ist die Verformungsbehinderung.



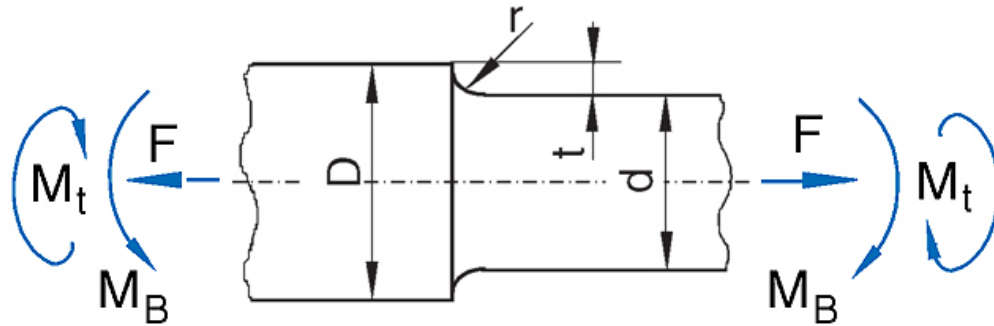
Der Schlüssel zum Verständnis der Beanspruchungen liegt im Verformungsverhalten der beteiligten Teilelemente zueinander. Hieraus ergibt sich das Prinzip der abgestimmten Verformung. Danach sind die Komponenten so zu gestalten, Steifigkeitssprünge minimiert und so unter Last weitgehende Anpassungen durch Relativverformungen entstehen.

Beispiele zu: **Wellen – Nuten**

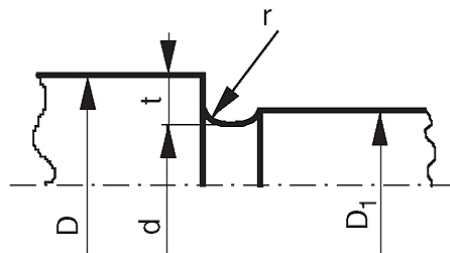


umlaufende Kerbe nach Norm

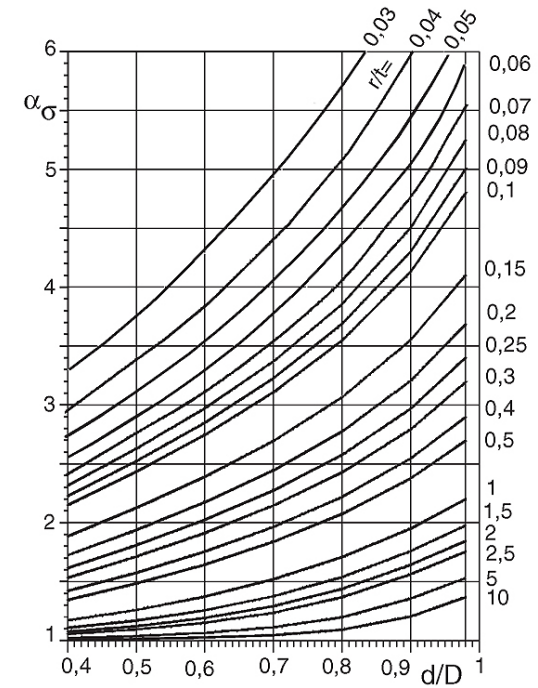
Beispiele zu: **Wellen – Absätze**



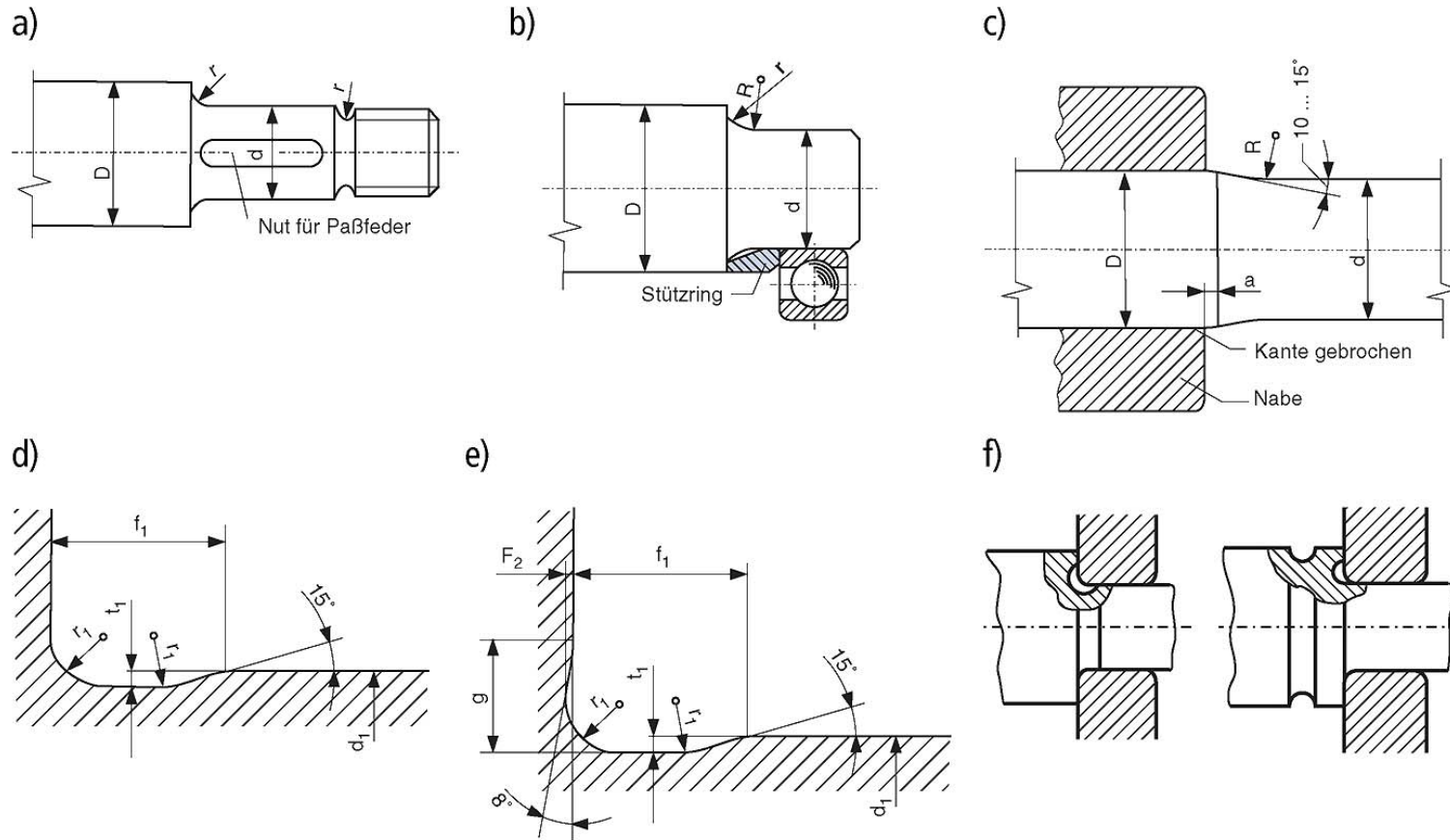
abgesetzte Welle nach Norm



Wellenabsatz mit Freistich nach Norm



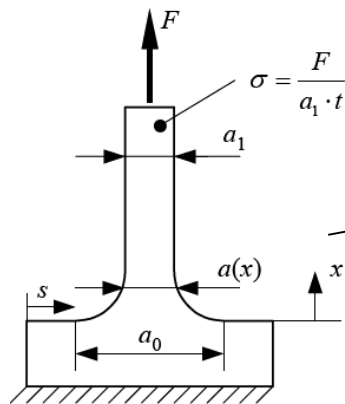
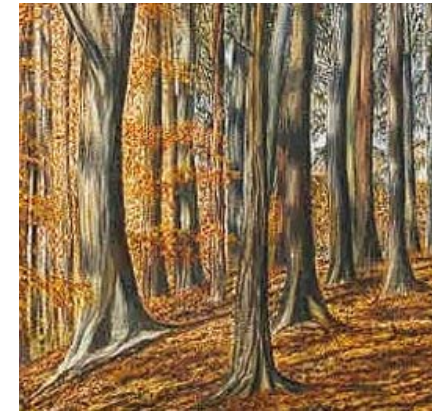
Kerbformzahl für abgesetzte Wellen unter Zugbeanspruchung



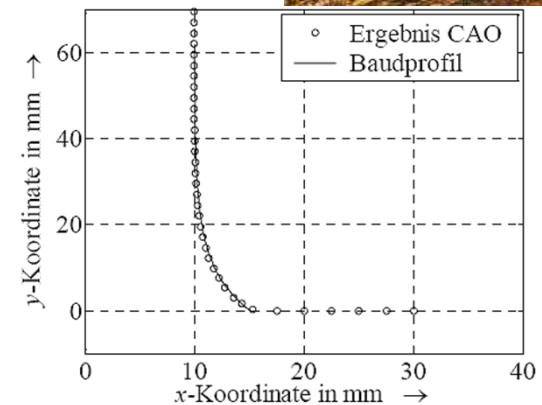
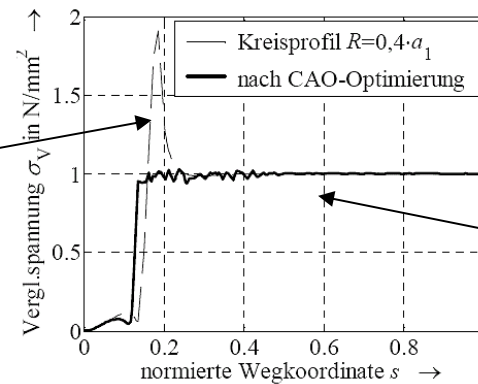
Gestaltung von Wellenabsätzen – a) Normaler Übergang, b) Übergang mit Korbbogen, c) Übergang ohne Schulter, d) Freistich Form E nach DIN 509, e) Freistich Form F nach DIN 509, f) Hinterdrehung mit Entlastungsrille

weitere Optimierung durch: **Baud-Profil**

- gleichmäßige Randfaserspannungen
- gewichts- und spannungsoptimiert



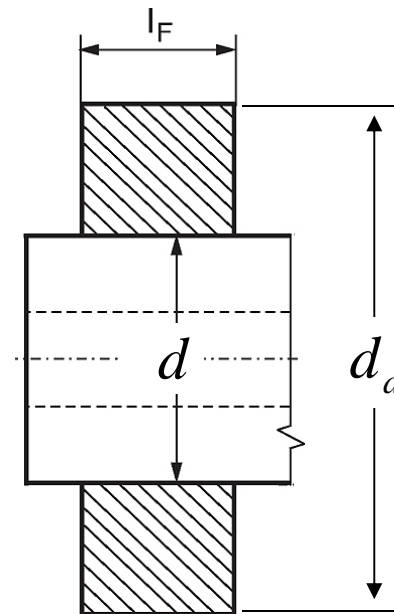
$$a(x) = a_0 \cdot \left[\frac{a_1}{a_0} + \left(1 - \frac{a_1}{a_0} \right) \cdot e^{-\frac{a_0}{2 \cdot a_1^2} \cdot x} \right]$$



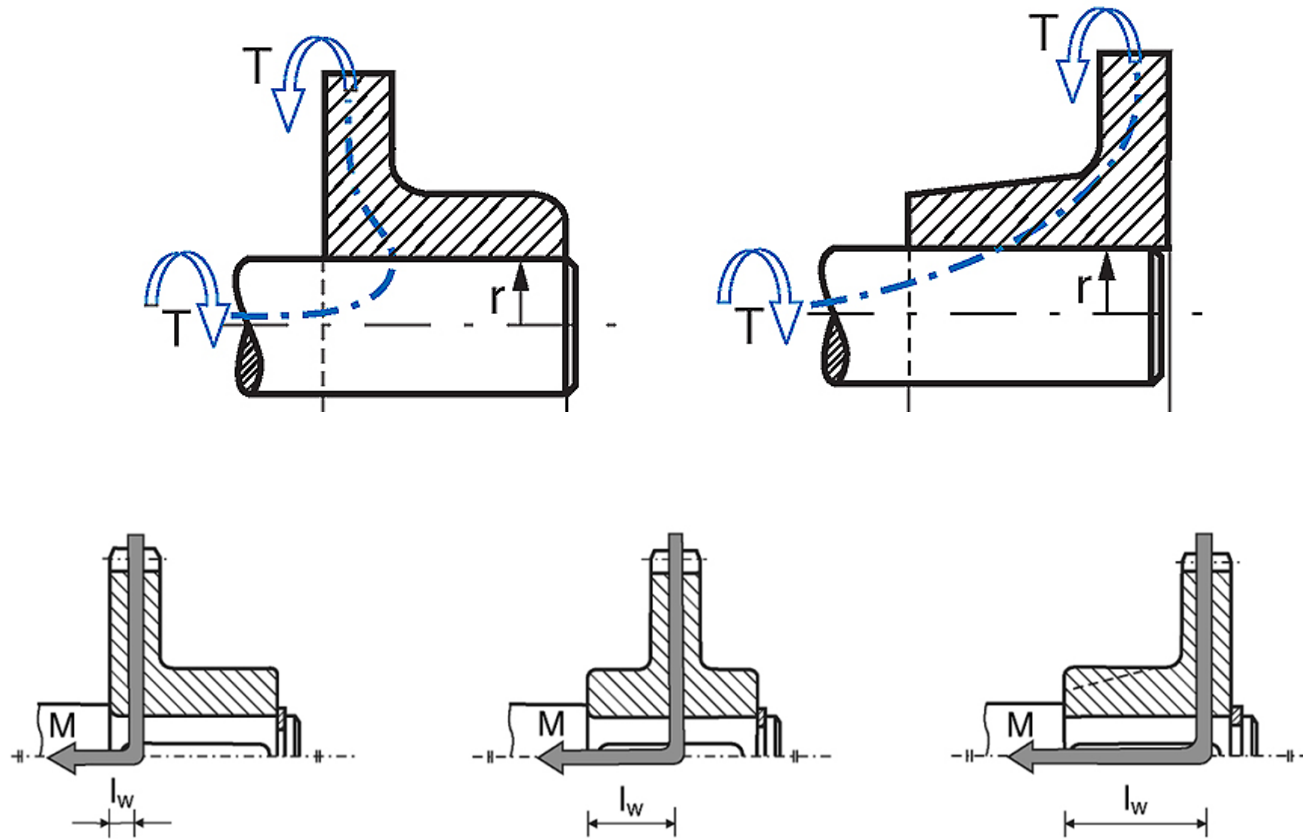
- Solche Methoden sind auf jegliche Querschnittsübergänge und Beanspruchungen anwendbar.

- Weitere typische Beispiele für die Beachtung verformungsgerechter Konstruktionen stellen die Welle-Nabe-Verbindungen dar. Analog zu Wellenabsätzen stellt der Übergang zur Nabe einen starken Steifigkeitssprung dar, der zu unterschiedlichen Torsionsverformungen führt. An Passfeder- und Zahnwellenverbindungen werden zum Teil aufwendige fertigungstechnische Maßnahmen zur Verringerung der Beanspruchungsspitze vorgenommen. Eine Angleichung der Nabensteifigkeit erfordert

und ist oftmals aus konstruktiven Gründen nicht möglich.



Beispiele zu: **Welle-Nabe-Verbindungen**



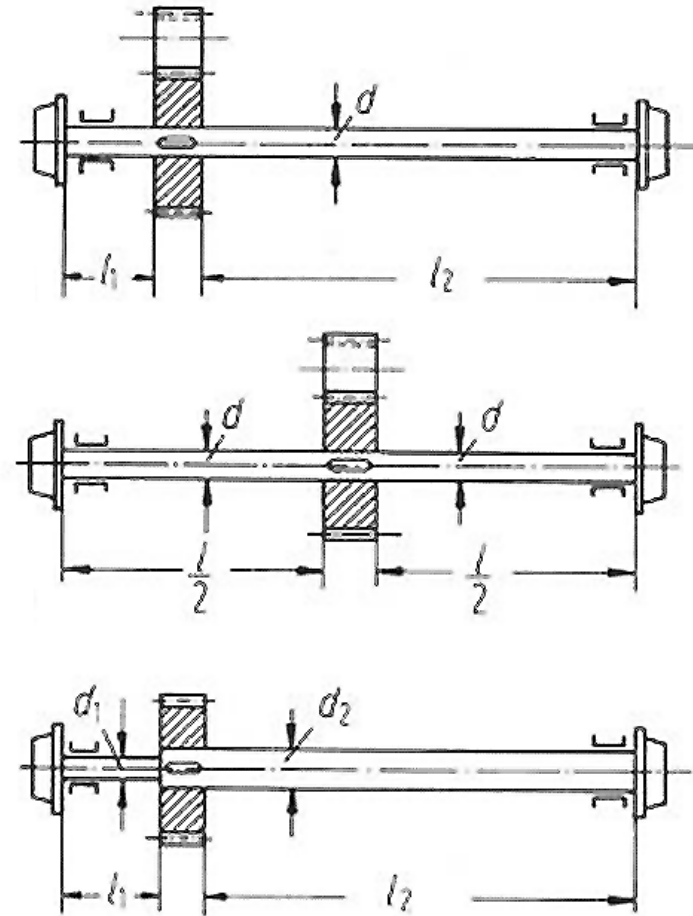
Welle-Nabe-Verbindungen mit unterschiedlichen Kraftflüssen

- Abgestimmte Verformungen oder das „Freigeben“ der Verformungen sind teilweise auch für die Funktionstüchtigkeit der Konstruktion maßgebend.

Bei nebenstehendem Kranantrieb wird ein Gleichlauf erzwungen durch symmetrische Anordnung (mitte) oder abgestimmte Federsteifen (unten).

$$\alpha_a = \frac{F * a * b(l + l_2)}{6 * EI * l}$$

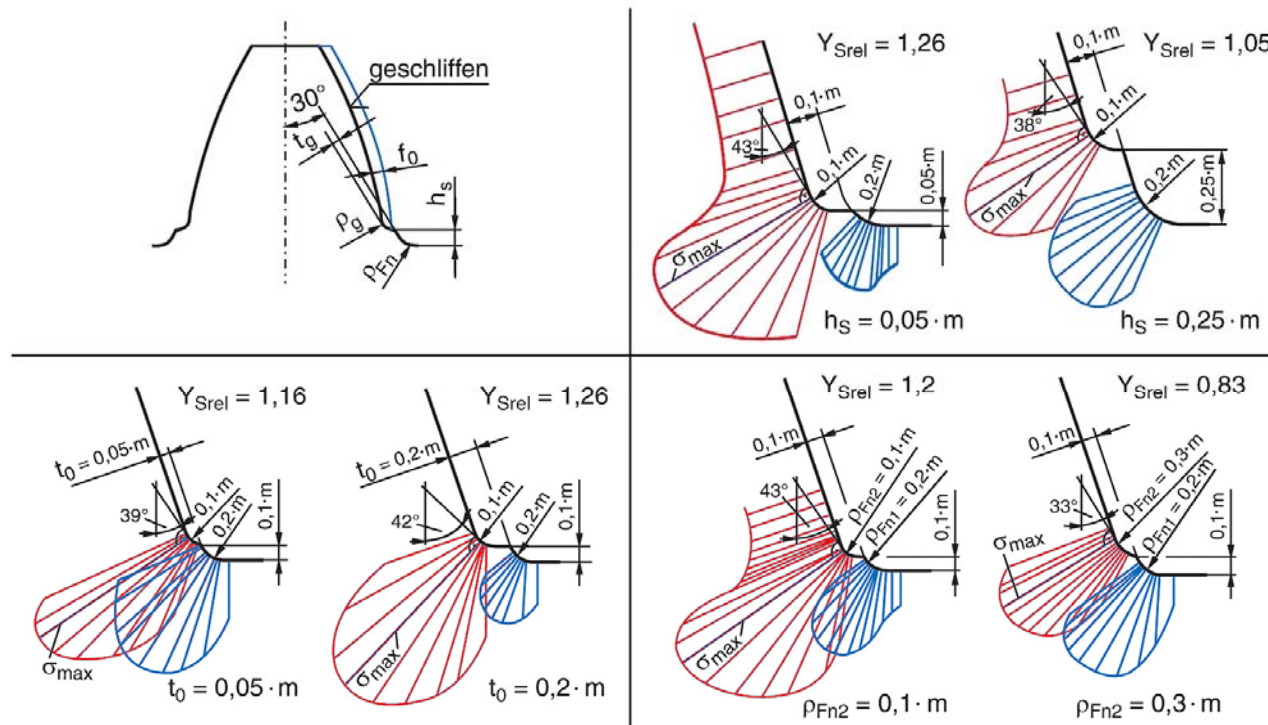
$$\alpha_b = \frac{F * a * b(l + l_1)}{6 * EI * l}$$



Welle-Nabe-Verbindungen mit unterschiedlichen Kraftflüssen

Beispiele zu: **Stirnrädern**

- Schleifkerben reduzieren die Dauerfestigkeit erheblich

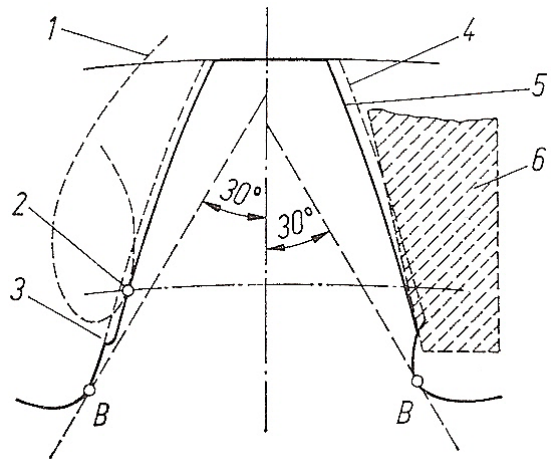


Spannungskonzentration bei Doppelkerben (Schleifabsatz)

- Gegenmaßnahme:

Ein geringer Unterschnitt begünstigt das Schleifen der Verzahnung.

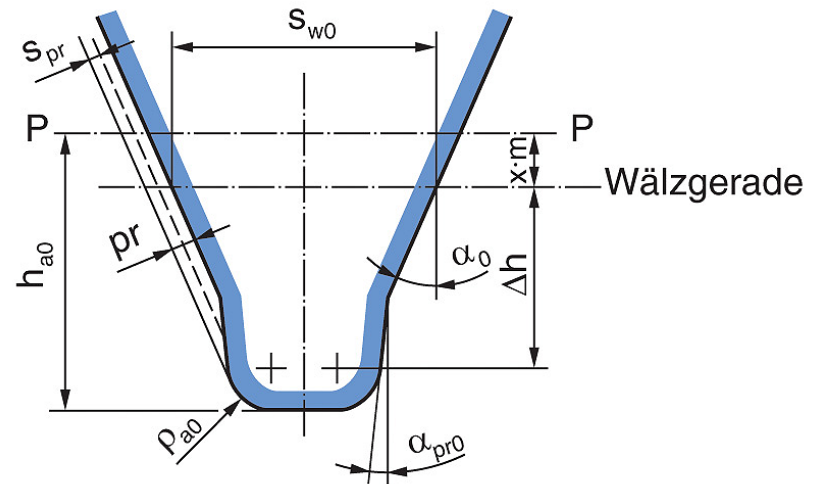
Aus dem gleichen Grund verwendet man zum Teil Werkzeuge mit Protuberanz.



Flankenform geschliffener Stirnräder

links) ohne Protuberanz

rechts) mit Protuberanz

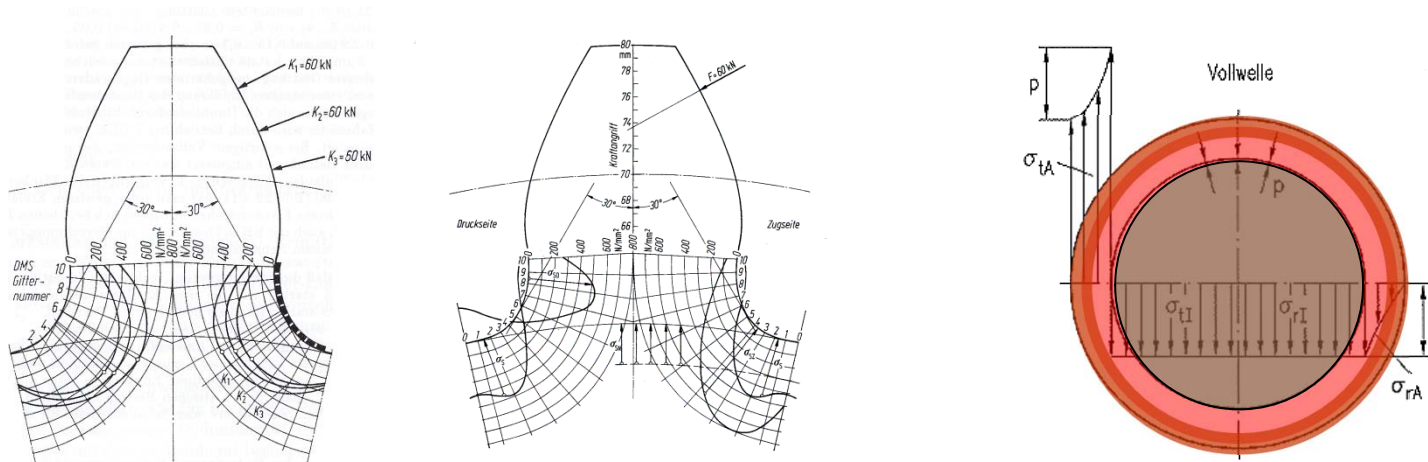


Protuberanzwerkzeug mit allgemeinem Profilwinkel α_0

Protuberanzwerkzeug mit allgemeinem Profilwinkel

- Bei aufgeschrumpften Bandagen überlagern sich statische Zugvorspannung aus dem Schrumpfung einerseits und Schwellspannung am Zahnfuß andererseits.
- Optimierungsmaßnahme: Größere Bandagendicke bewirkt kleinere Schrumpfungsspannungen am Fußkreis

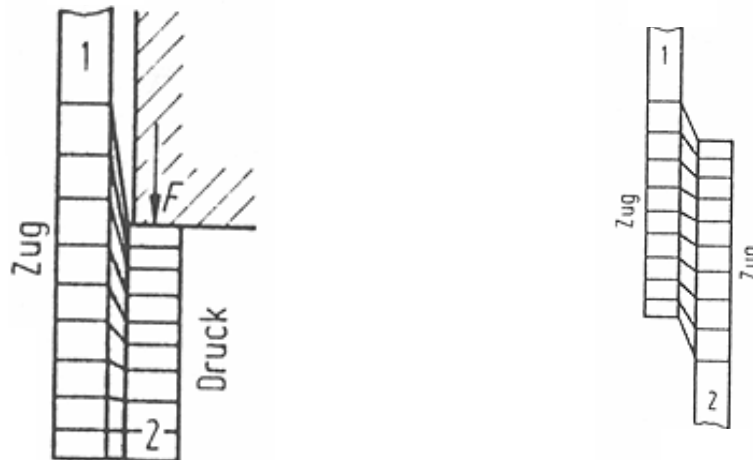
Protuberanz



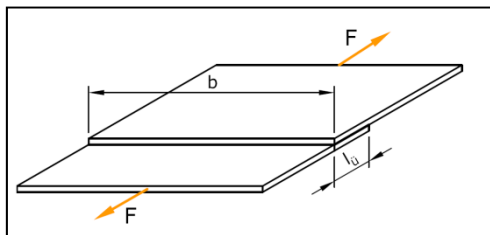
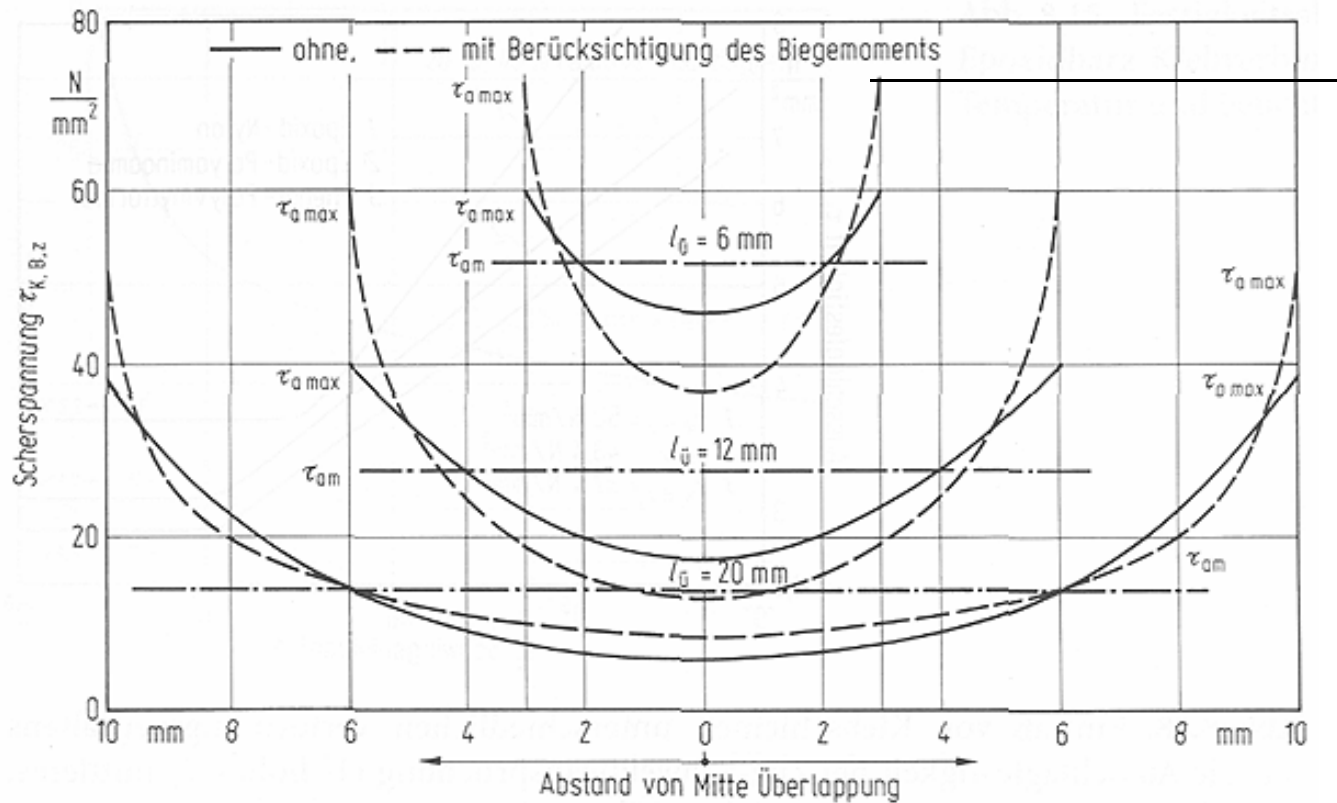
Vergleich der Zahnfußspannungen einem Zahnrad aus Vollmaterial (links) und mit Bandage (rechts)

Beispiele zu: **Klebeverbindungen**

- Die resultierende Spannungsverteilung entlang der Überlappung ist ungleichmäßig, es treten im Bindemittel Spannungsspitzen auf. Die Endpunkte müssen einer höheren Beanspruchung standhalten als in der Mitte.

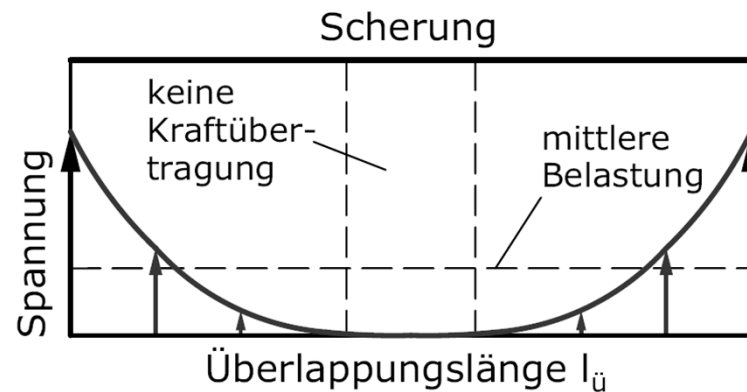


Spannungsverteilungen bei auf Scherung beanspruchten Klebeverbindungen



Spannungsverteilung bei Scherbeanspruchung einer Überlappungs-Klebeverbindung bei unterschiedlicher Überlappungslänge ($l_{\bar{u}}$)

- Eine Erhöhung der Überlappungslänge ($l_{\ddot{u}}$) führt nicht zu einer proportionalen Erhöhung der Belastungsgrenze. Ein übertriebenes Vergrößern von $l_{\ddot{u}}$ in Verbindung mit ungünstigem Klebstoffverhalten kann im Extremfall dazu führen, dass im mittleren Bereich der Klebefläche keine Kraftübertragung mehr gewährleistet ist.



Spannungsverteilung einer auf Scherung beanspruchten Klebverbindung bei zu groß gewählter Überlappung

- Richtwerte für das Überlappungsverhältnis

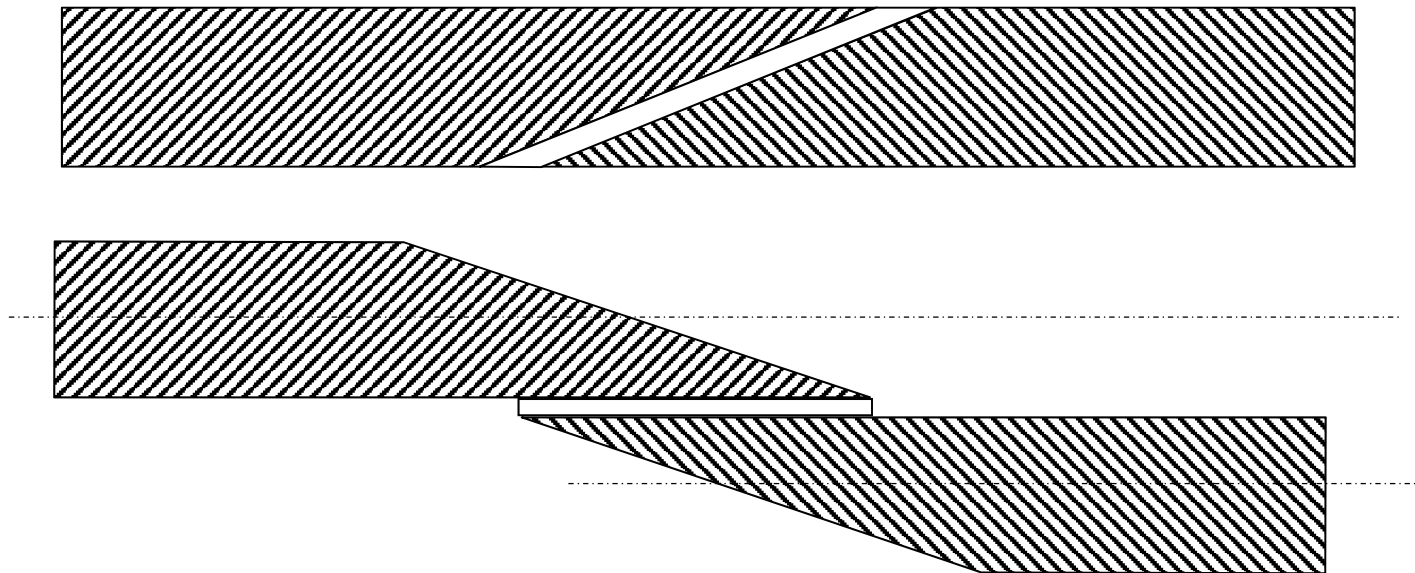
Stahl	$l_{\text{Ü}}/t = 7,5 \dots 15$
Al-Legierung	$l_{\text{Ü}}/t = 5 \dots 10$
Nichtverstärkte Kunststoffe	$l_{\text{Ü}}/t = 2 \dots 4$
Faserverstärkte Kunststoffe	$l_{\text{Ü}}/t = 5 \dots 10$

... von geklebten Flächenverbindungen (t = Dicke des dünneren Bauteils)

Weichlötverbindungen:	$l_{\text{Ü}}/t = 6 \dots 8 \dots (12)$ (bis 12 bei einseitigem Laschenstoß)
Hartlötverbindungen:	$l_{\text{Ü}}/t = 3 \dots 6$
Hochtemperaturlötverbindung: ¹⁾	$l_{\text{Ü}}/t = (2) \dots 4$

... von gelöteten Flächenverbindungen (t = Dicke des dünneren Bauteils)

- Gegenmaßnahme:

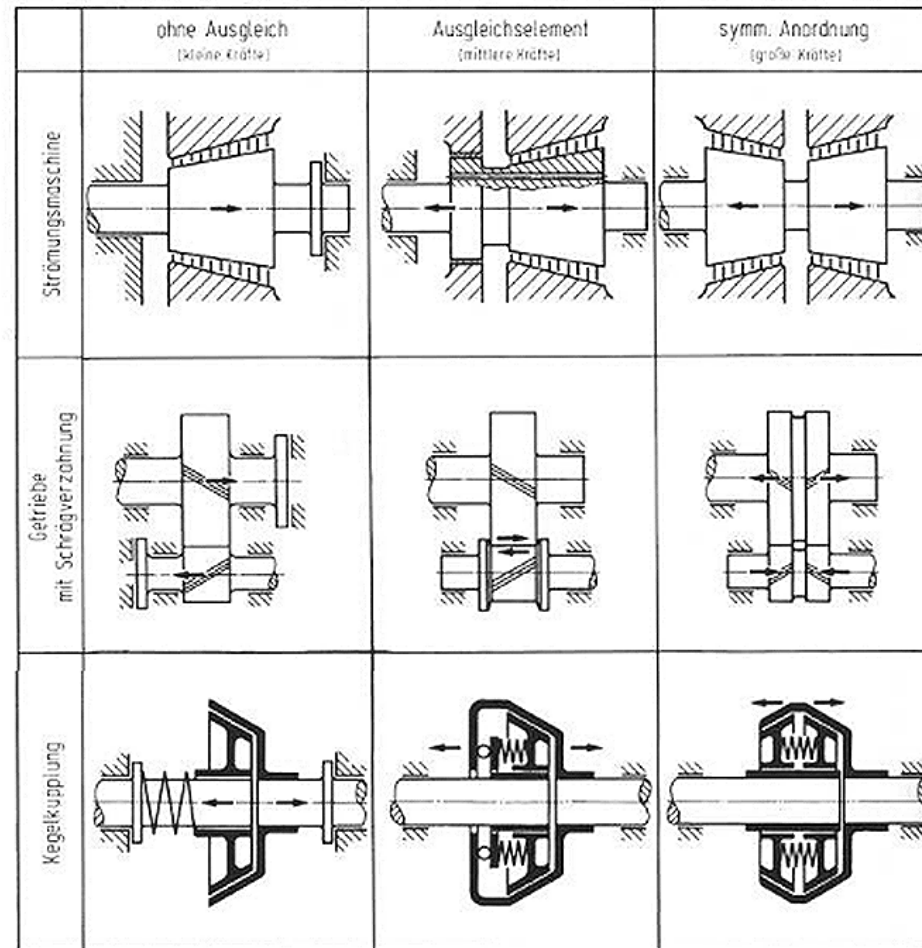


Ausgleich der Dehnungsunterschiede durch Schäften (Anwendung im Flugzeugbau)

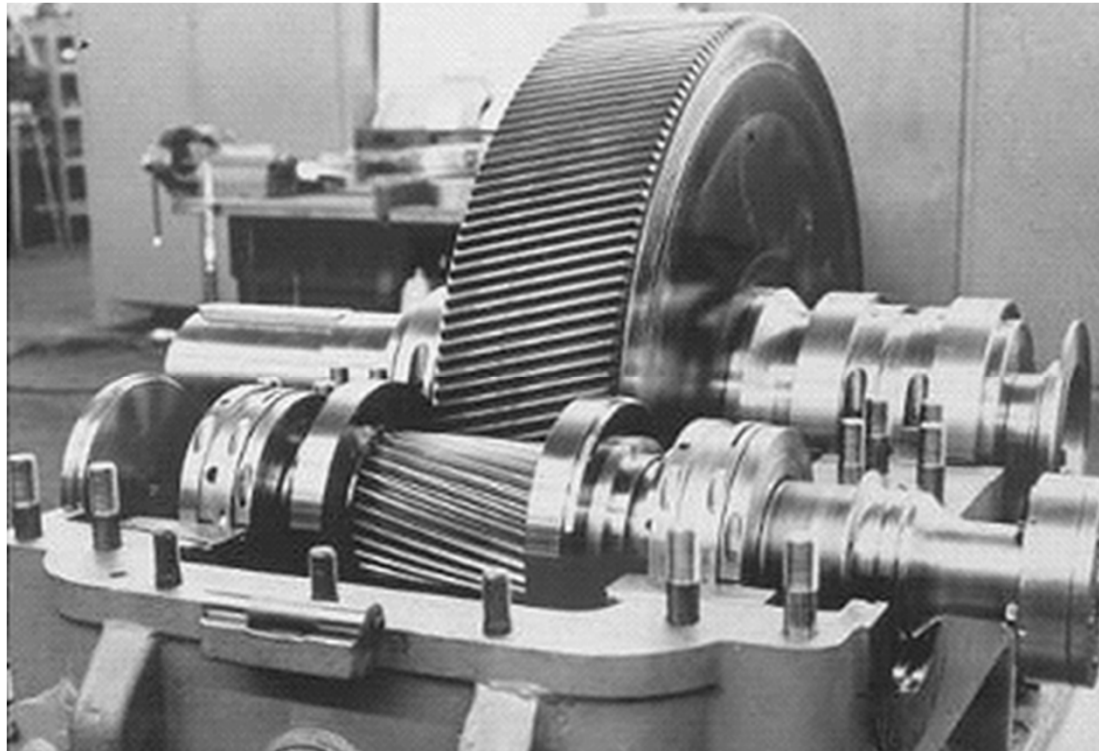
2.1.3 Prinzipien des Kraftausgleichs

- Bedingt durch das Wirkprinzip können in Konstruktionen Kraftgrößen auftreten, die die Struktur belasten:
 - Axialkräfte- und Biegemomente bei einer Schräg- oder Kegolverzahnung
 - Normalkräfte zur Erzeugung reibschlüssiger Verbindungen
 - Druck x Fläche in Maschinen und Behältern
 - Strömungskräfte in Rohrleitungen, Krümmern, Strömungsmaschinen
 - Massenkräfte bei translatorischen und rotatorischen Bewegungen

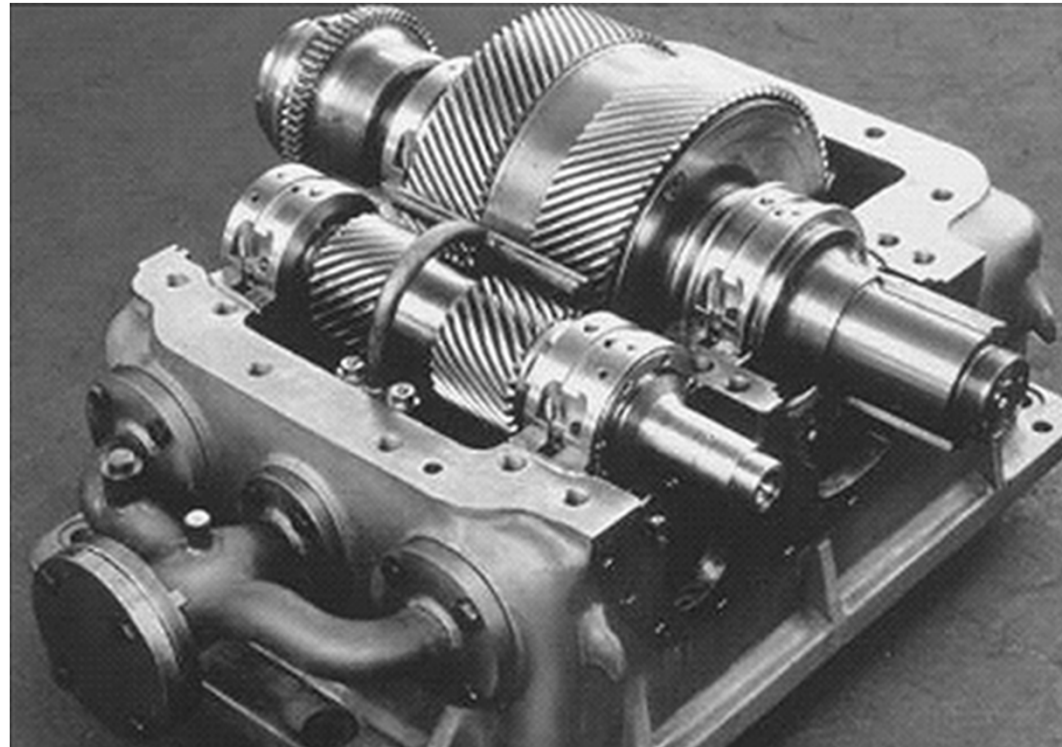
- Die Abbildung zeigt schematisch drei Beispiele, bei denen das Prinzip der kurzen Kraftleitungswege eingehalten wird. Auf diese Weise werden keine Lagerstellen zusätzlich belastet und der Bauaufwand kann entsprechend gering gehalten werden.



Grundsätzliche Lösungen für Kraftausgleich am Beispiel einer Strömungsmaschine, eines Getriebes und einer Kupplung



Getriebe mit Druckkamm



Getriebe mit Doppelschrägverzahnung

2.2 Prinzipien der Aufgabenteilung

- Bereits beim Aufstellen der Funktionsstruktur stellt sich die Frage nach der notwendigen Anzahl und Gliederung der Funktionen. Im Regelfall sind immer mehrere Funktionen zu erfüllen, so dass bei der Lösungssuche und –bewertung entschieden werden muss in:
 - 1) je ein Funktionsträger für eine Funktion
 - 2) ein Funktionsträger für mehrere Funktionen

- **Ein Funktionsträger für mehrere Funktionen**

- Vorteile: Normalerweise sind Maschinen nach diesem Prinzip aufgebaut.

Beispiel Welle:

- Nachteile: Funktionsträger ist optimiert für eine Funktion

Über- oder Unterdimensionierung für andere Funktionen

Aus diesem Zusammenhang ergeben sich dann Probleme, wenn die Leistungsfähigkeit des Funktionsträgers bezüglich einer mehrerer Funktionen gesteigert werden oder wenn das Verhalten des Funktionsträgers bezüglich einer wichtigen Funktion unbedingt eindeutig und unbeeinflusst sein muss.

- **Je ein Funktionsträger für eine Funktion**

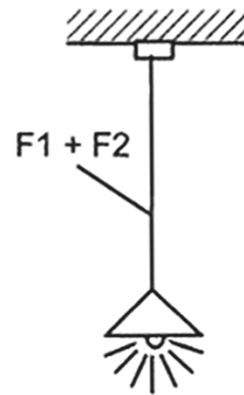
- Vorteile:
- klare Aufteilung der Funktionsträger
 - bessere Ausnutzung des Funktionsbauteils in Bezug auf seine Funktion
 - bessere Berechenbarkeit und Optimierbarkeit
 - geringere Komplexität
 - eine Funktion auf mehrere Funktionsträger aufteilen → Redundanz

- Nachteile:
- mehr Bauteile, größerer Bauraum → Gewicht
 - höherer konstruktiver Aufwand

Beispiel: Lampenaufhängung

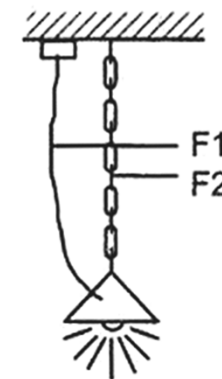
Im rechten Teil wird die Funktion des Tragens der Lampe auf ein gesondertes Element „Kette“ gelegt. Dies ist insbesondere dann anzuraten, wenn die Leuchte ein erhebliches Gewicht aufweist und Zweifel bestehen, ob das Stromführungskabel eine hinreichend mechanische Festigkeit für die Erfüllung dieser Aufgabe besitzt.

Funktionsvereinigung



F1 + F2: Zuleitungskabel

Funktionsstrennung

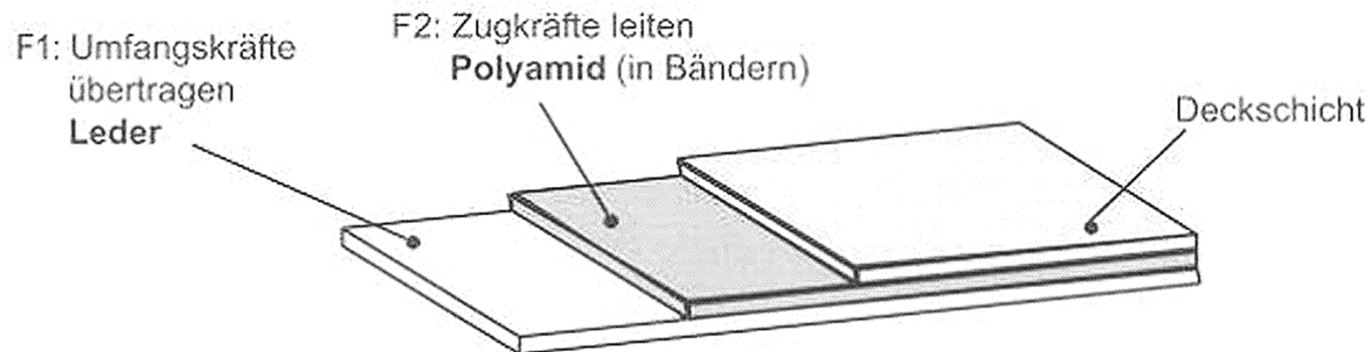


F1: Zuleitungskabel
F2: Kette

Funktionsvereinigung und -trennung am Beispiel einer Leuchtaufhängung

Beispiel: Verbundriemen

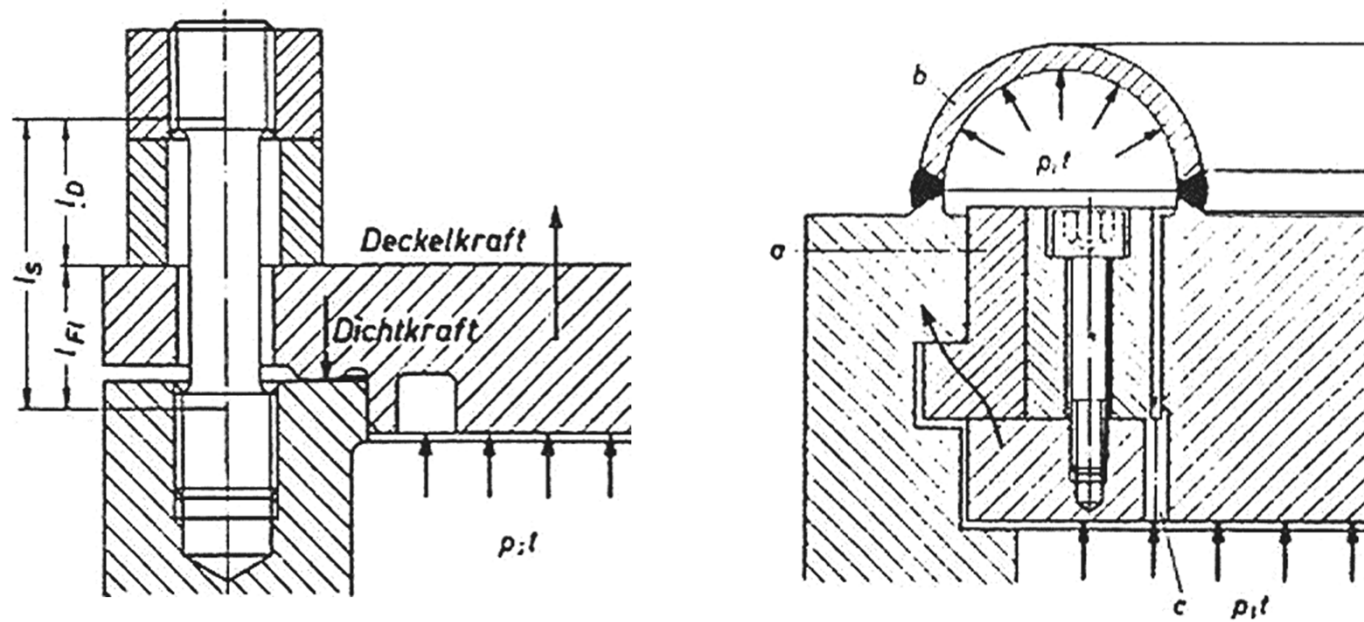
Die Motivation zur Aufgabenteilung wird am Beispiel des Verbundriemens deutlich. Früher war es üblich, dass eine Lederriemen die Aufgaben „Zugkraft leiten“ und „Umfangskraft durch Reibung übertragen“ übernahm. Um höhere Leistungen und Geschwindigkeiten zu übertragen, wurde der Verbundriemen entwickelt. Dieser enthält eine Zugschicht aus Polyamid (F2) mit hoher Festigkeit und eine Reibschicht aus Leder (F1). Eine ähnliche Aufgabentrennung liegt bei Keilriemen vor.



Aufgabentrennung bei Flachriemen

Beispiel: Deckelverschluss für Druckbehälter

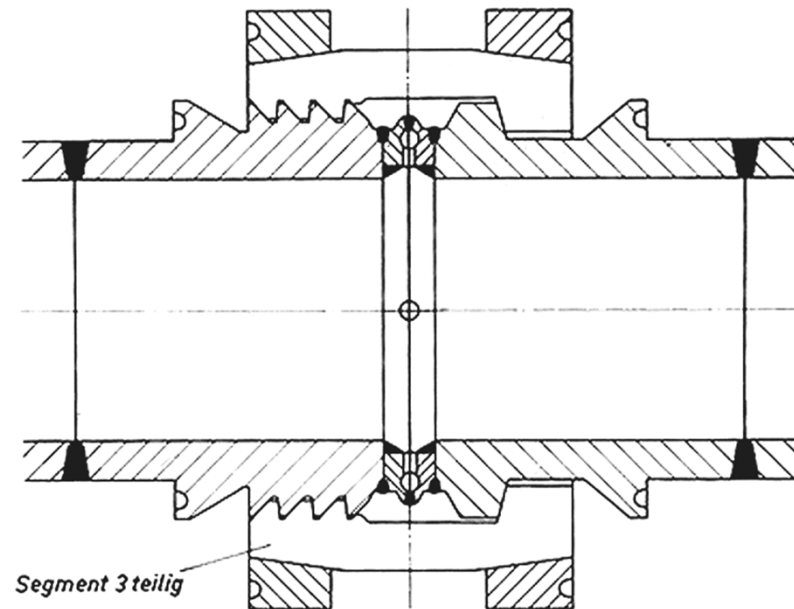
Funktionen:



- Die Lösung über eine formschlüssige Kraftaufnahme und eine stoffschlüssige Schweißdichtung gestattet die gezielte Optimierung für beide Aufgaben.

Beispiel: Zikesch-Klammer

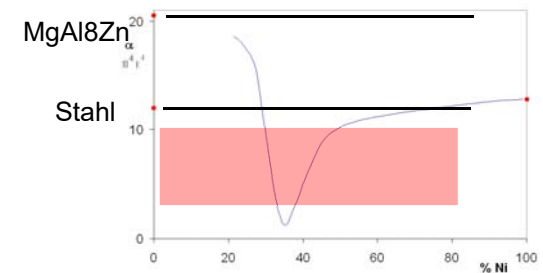
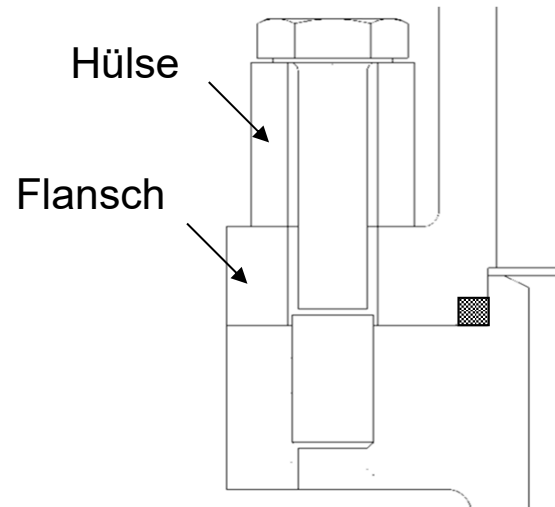
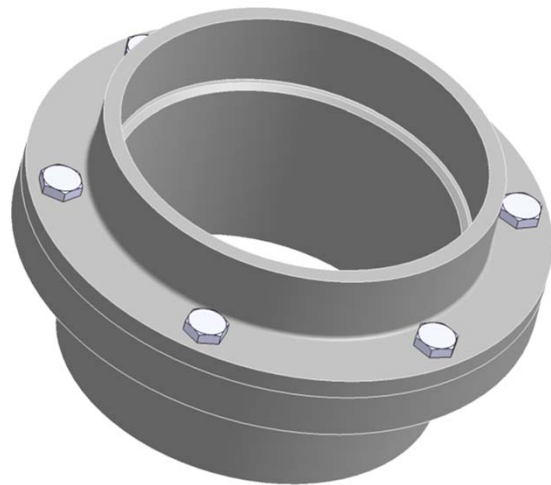
Eine ähnliche Aufgabentrennung zwischen Kraftleitung und Abdichtung wird bei Rohrleitungsverbindungen im Heißdampfbereich vorgenommen.



Heißdampf-Rohrleitungsverbindung (Zikesch-Klammer)

Beispiel: Thermisch beanspruchte Rohrflanschverbindung

Funktionen:

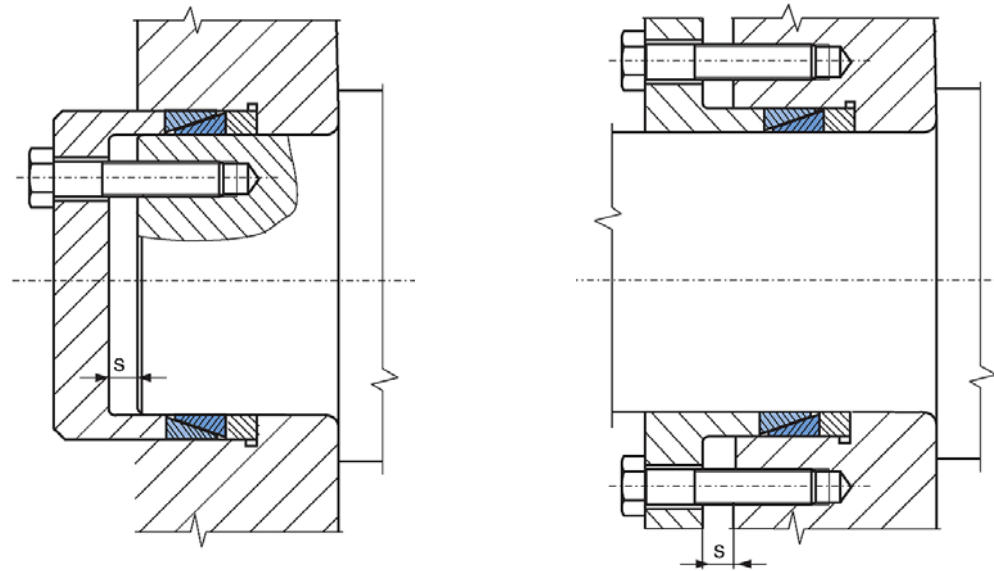


Invar-Legierungen,
z.B FeNi25

Beispiel: Welle-Nabe-Verbindungen (1)

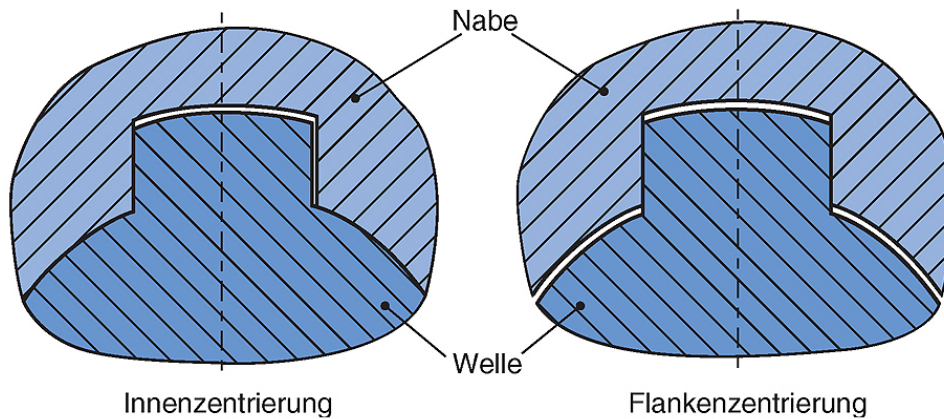
Funktionen:

- Die Trennung der Funktionen ermöglicht eine eindeutigere Auslegung der Verbindung.

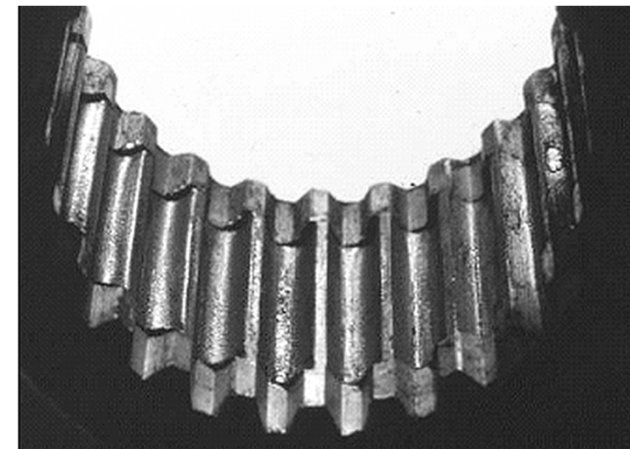


Beispiel: Welle-Nabe-Verbindungen (2.1)

- Flankenzentrierte Keilwellen oder Zahnwellen sollten nur geringfügig auf Querkraft und damit nicht auf Biegung beansprucht werden, da ein radiales Spiel für die Montage unvermeidbar ist.



Keilwellenverbindungen mit Innen- und Flankenzentrierung

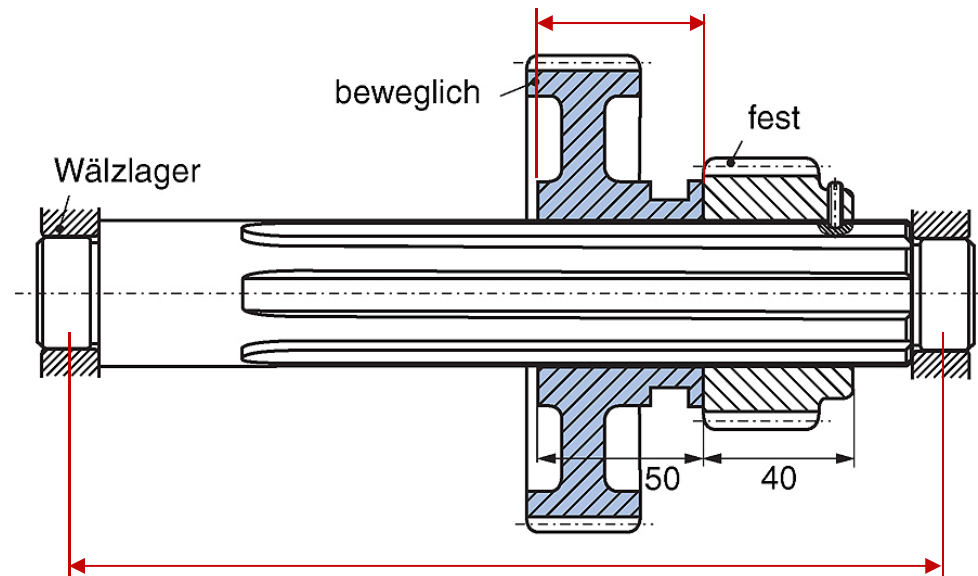


Reibverschleiß bei Übernahme der Zentrierfunktion durch die Zahnwellenflanken

Beispiel: Welle-Nabe-Verbindungen (2.2)

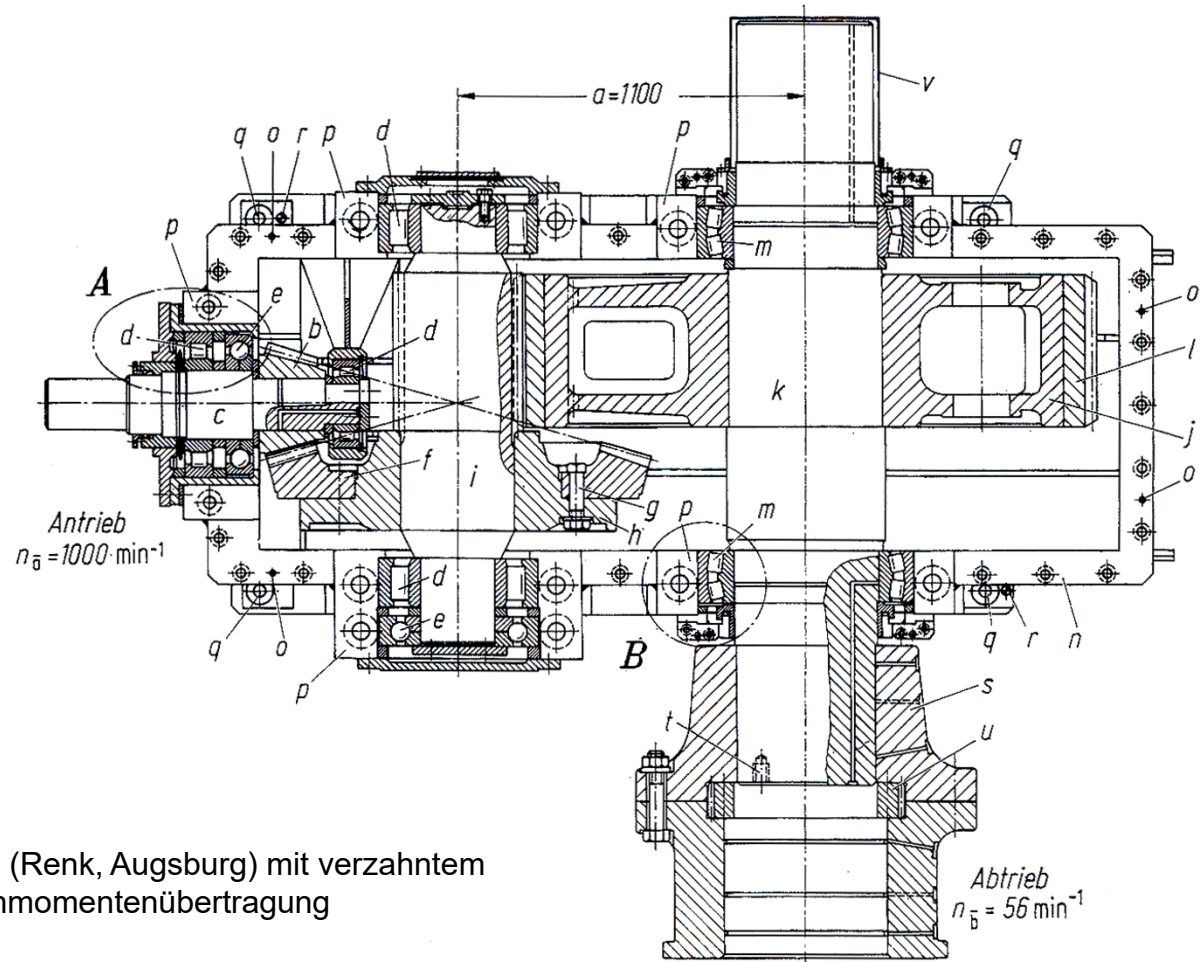
- In diesem Fall muss der Wellendurchmesser sowohl für das Drehmoment als auch für die zulässige Biegung ausgelegt werden. Infolge dessen ist die Welle u. U. für die Funktion „Drehmoment übertragen“ überdimensioniert.

- Konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung des Keilwellendurchmessers:



Verschiebezahnrad mit Keilwellenverbindung

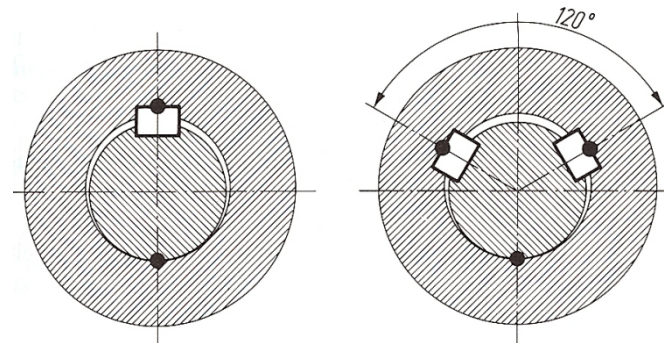
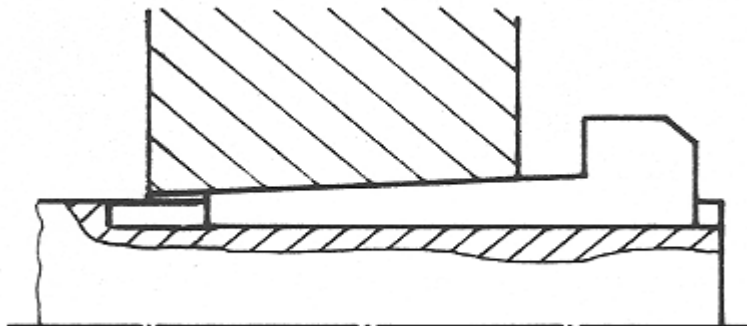
Beispiel: Welle-Nabe-Verbindungen (2.3)



Bandgetriebe (Renk, Augsburg) mit verzahntem Ring zur Drehmomentenübertragung

Beispiel: Welle-Nabe-Verbindungen (3.1)

- Im Vergleich zur Passfederverbindung stellt die Keilverbindung eine Reibschlussverbindung dar, bei der die Normalkraft F_N durch Eintreiben über die Keilfläche erzeugt wird.

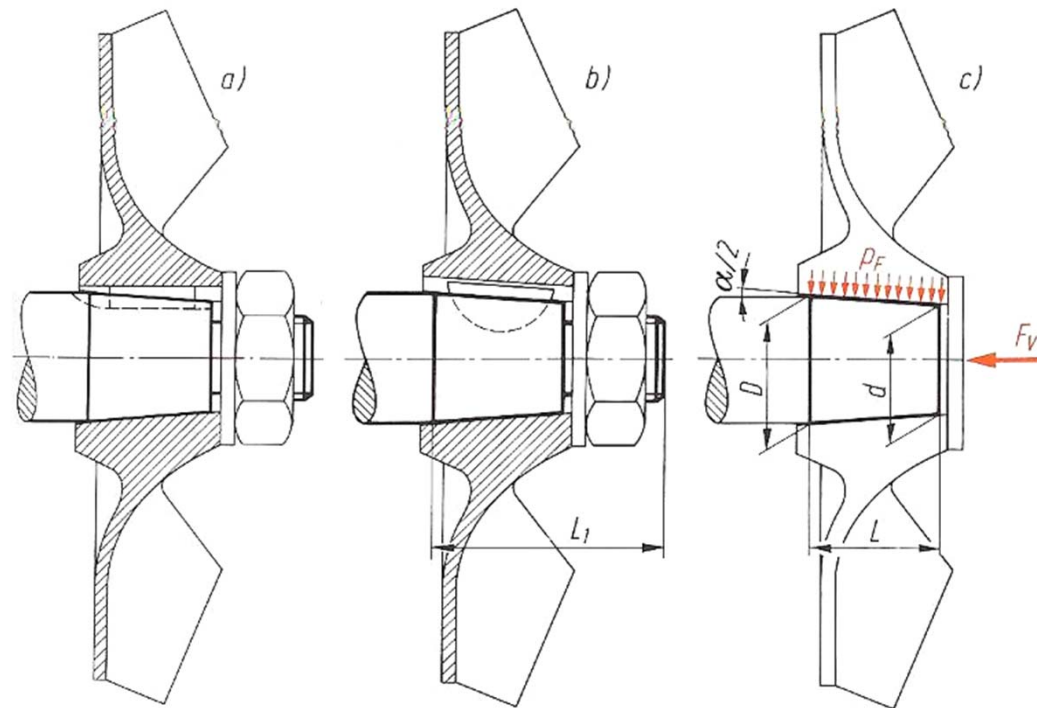


Exzentrischer Sitz von Nabe und Welle nach dem Verkeilen

links) Zweipunktlage
rechts) Dreipunktlage

Beispiel: Welle-Nabe-Verbindungen (3.2)

- Regel: Keine Mischung aus Form- und Reibschluss konstruieren, da



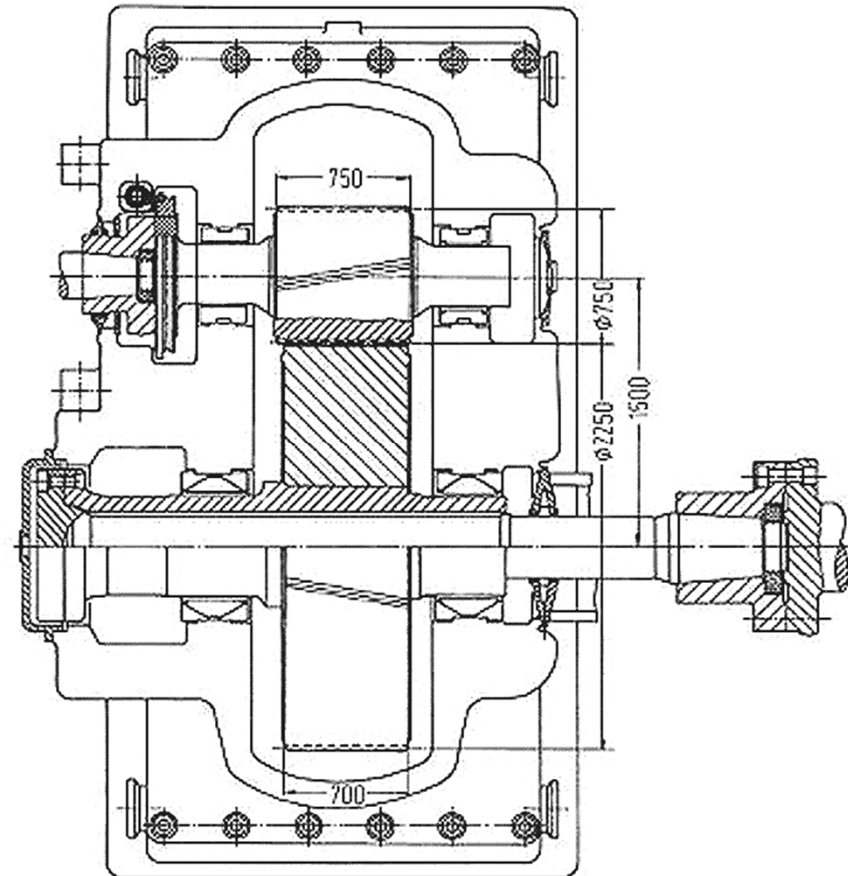
Beispiel: Leistungsgetriebe zwischen Turbinen und Generator (1)

- Funktionen:
- 1) Übertragung des Torsionsmomentes
 - 2) biegeweicher Anschluss an den Generator infolge Wärmedehnungen
 - 3) steife Getriebewellen zur Erhaltung des Zahneingriffs

Randbedingungen: kompakte, kurze Bauweise

Beispiel: Leistungsgetriebe zwischen Turbinen und Generator (2)

- Die konstruktive Lösung geschieht durch die Trennung der Funktionen 2) und 3) und der Dimensionierung der maßgebenden Funktion 1).
Damit bietet das auf einer Hohlwelle befestigte Getrieberad bei einem möglichst kleinen Achsabstand genügend Steifigkeit. Der Anschluss über eine entsprechend lange Torsionswelle vermag Querverschiebungen auszugleichen.



Beispiel: Einstellfunktionen bei Montage (1)

- Insbesondere bei Wälzlagern ist die getrennte Auslegung nach Radial- und Axialkräften üblich. Daher muss die Konstruktion gewährleisten, dass jedes Lager nur die Last erhält, für das es ausgelegt ist sowie die Einstellmöglichkeit eines Lagerspiels.

Funktionen:

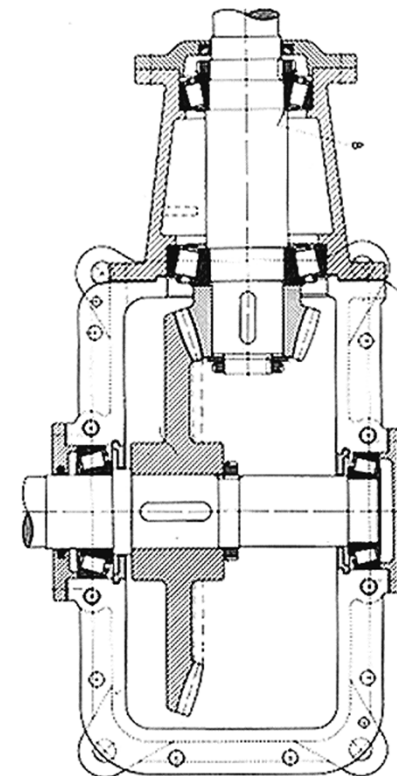
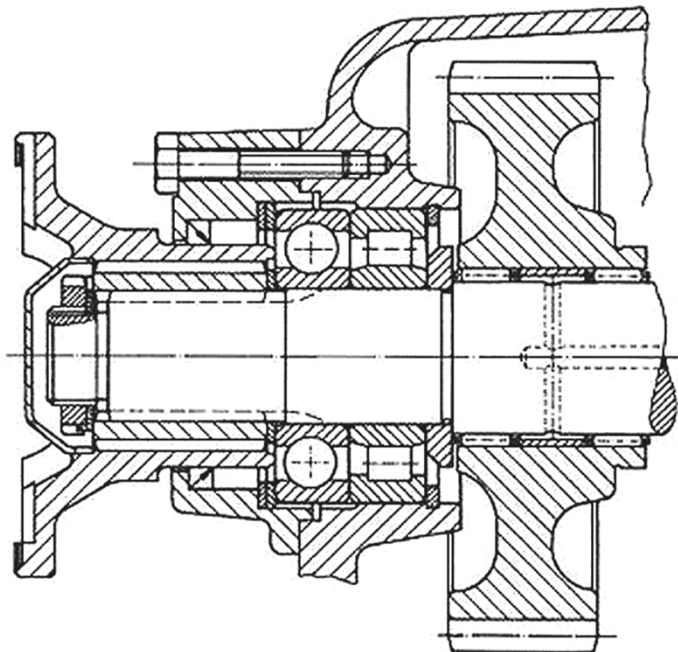
- 1.) Einstellung radiales Spiel
- 2.) Einstellung axiales Spiel

Bei Kegelradgetrieben kommt als 3. Funktion die Einstellung der Kegelräder hinzu.

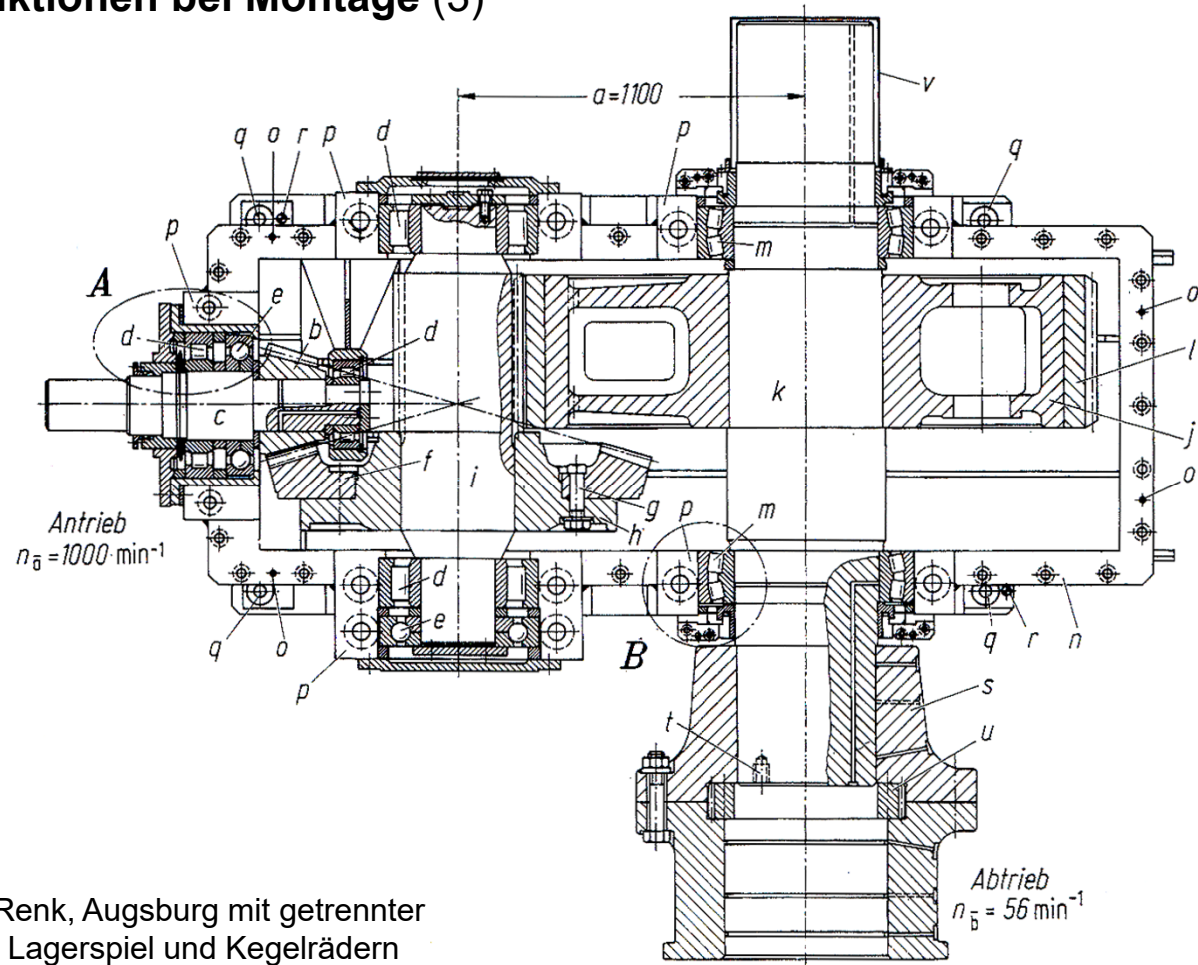
- Diese Einstellungen müssen so ermöglicht werden, dass sie unabhängig voneinander vorgenommen werden und sich auch gegenseitig nicht beeinflussen.

Beispiel: Einstellfunktionen bei Montage (2)

- Eindeutige Trennung der Kräfte: das Rillenkugellager ist am Außenring nicht geführt und überträgt nur Axialkräfte, das Rollenlager nur Radialkräfte
- Trennung von Lager- und Kegelradeinstellung



Beispiel: Einstellfunktionen bei Montage (3)



Bandgetriebe (Renk, Augsburg mit getrennter Einstellung von Lagerspiel und Kegelrädern

2.3 Prinzip der Selbsthilfe

- Im vorangegangenen Abschnitt beim Prinzip der Aufgabenteilung wurde das Ziel verfolgt, dass die Funktionen auf einzelnen Funktionsträgern unbeeinflusst voneinander verwirklicht werden.
- Bei dem Prinzip der Selbsthilfe erfolgt die Anordnung der Systemelemente so, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Funktionen die Wirkungsweise positiv beeinflusst, d. h.
 - Hauptfunktion wird verstärkt
 - Lebensdauer wird erhöht
 - Verschleiß, Erwärmung wird verringert

- Anwendungen

bei Normalsituation (Normallast)

bei Notsituation (Überlast)

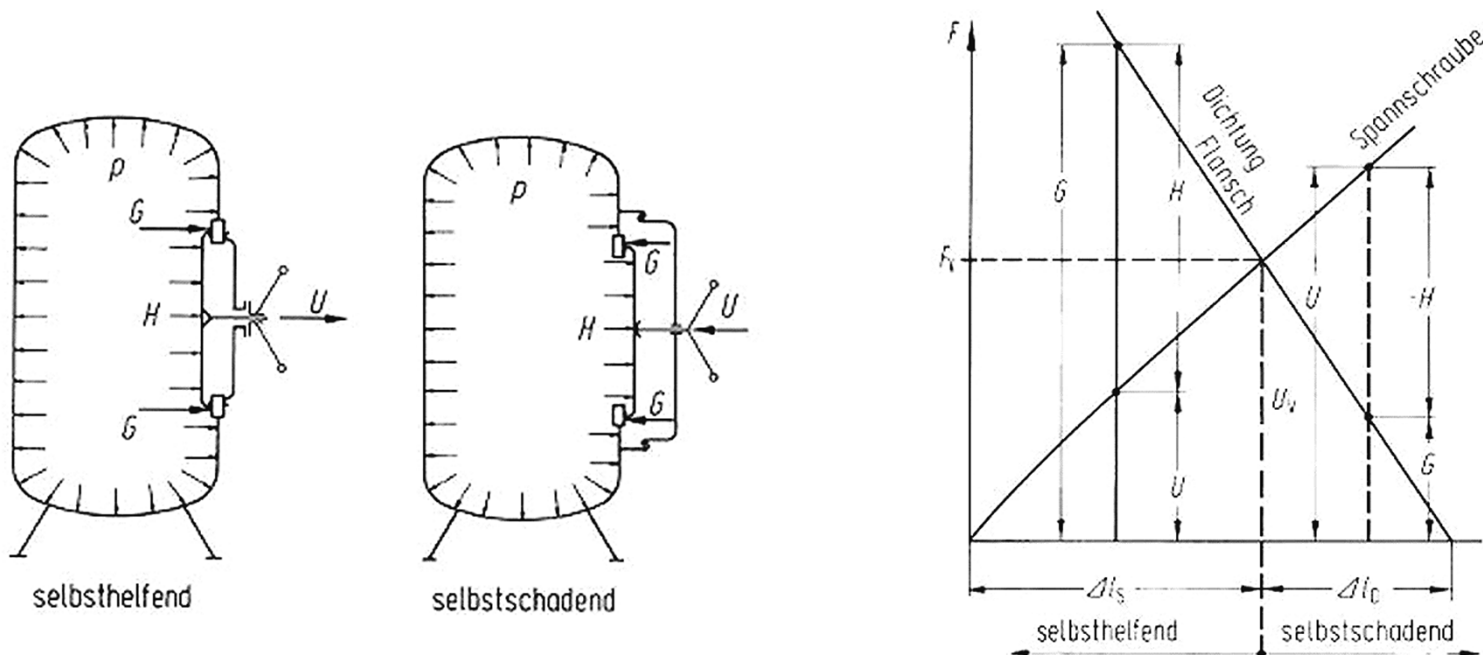
- Prinzip

Die erforderliche Gesamtwirkung G entsteht aus einer Ursprungswirkung U und einer Hilfswirkung H . Die Ursprungswirkung leitet den Vorgang ein, stellt die notwendige Anfangssituation und entspricht in vielen Fällen der herkömmlichen Lösung ohne Hilfswirkung.

- Die Hilfswirkung wird aus funktionsbedingten Hauptgrößen und/oder derer begleitenden Nebengrößen gewonnen. Eine definierte Zuordnung ist Voraussetzung.

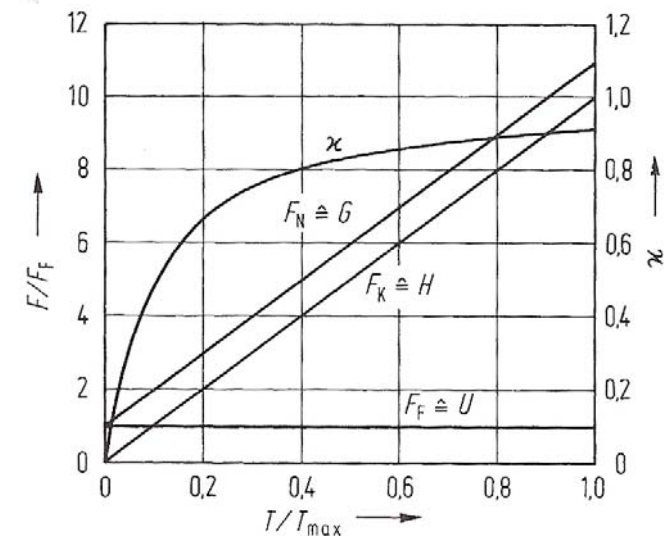
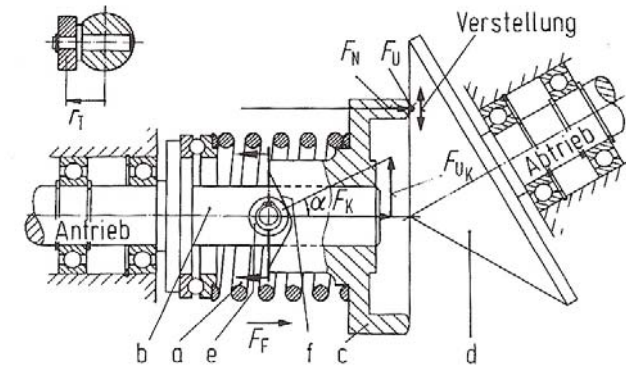
Beispiel: Mannlochdeckel

- Bei der linken Anordnung verstärkt die Deckelkraft (Hilfswirkung) die Schraubenvorspannkraft (Ursprungswirkung) und erhöht die Dichtkraft (Gesamtwirkung). Bei der rechten Anordnung setzt die Deckelkraft die Deckelkraft herunter, da sie gegen die Schraubenvorspannkraft wirkt.



Beispiel: Reibradgetriebe (1)

- Die Feder a presst den auf der Welle b frei verschiebbaren Topf c gegen die Kegelscheibe d und stellt damit die Ursprungswirkung sicher. Bei Einleitung eines Drehmoments wird die auf der Welle b sitzende Rolle e gegen die schräge Kante f des Topfes gedrückt und erzeugt dort eine Normalkraft, die sich in eine Umfangskraft F_{UK} und eine Axialkraft F_K zerlegt. Die Axialkraft leistet die Hilfswirkung und erhöht die Anpresskraft auf die Kegelscheibe.



Beispiel: Reibradgetriebe (2)

- Hieraus wird der Selbsthilfegrad berechnet

Beispiel: Reibradgetriebe (3)

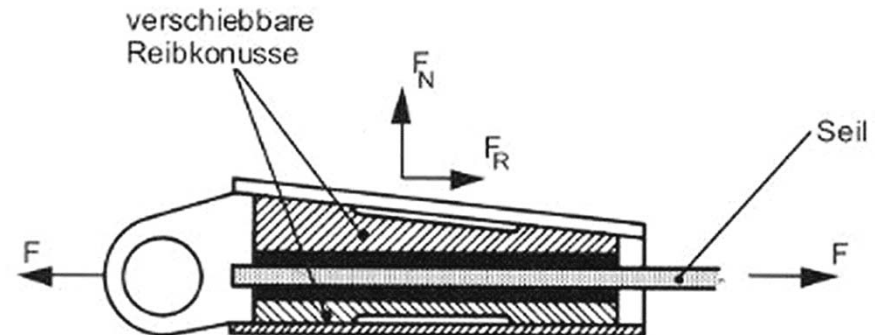
- Durch diesen Effekt werden alle Belastungen und damit auch Verschleiß und Lebensdauer positiv gegenüber einer Lösung mit fest eingestellter Axialkraft beeinflusst. Beispielsweise zeigt ein Überschlag, dass ein Teillastbetrieb von 75% der Nennlast eine Lagerentlastung von 20% bewirkt. Hieraus kann ein Selbsthilfegewinn bezogen auf die Lebensdauer der Lager wie folgt berechnet werden:

- Von der Anwendung her unterscheidet man zwischen:
 - Selbstverstärkende Lösungen

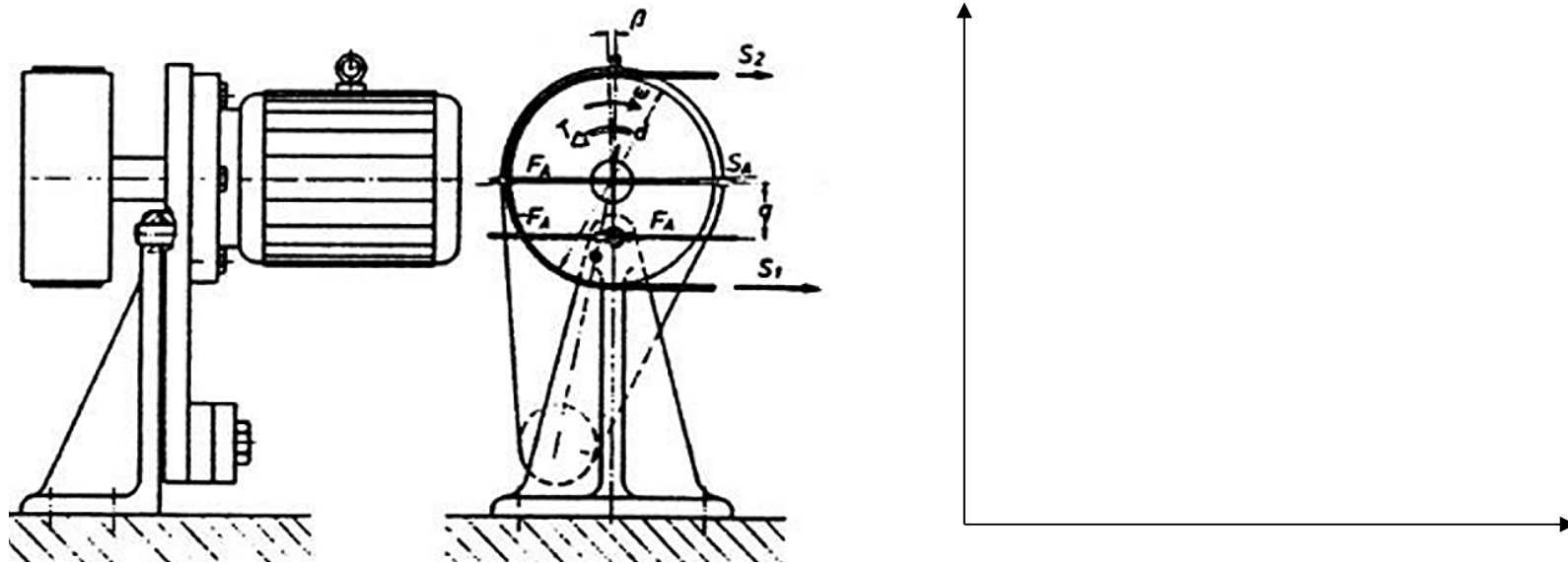
Bereits unter Normallast wird die Hilfsgröße in fester Zuordnung zu einer funktionsbedingten Hauptgröße gewonnen. Ziel ist eine Entlastung im Teillastbereich oder ein Beanspruchungsausgleich.

Beispiel: Selbstverstärkende Klemmen

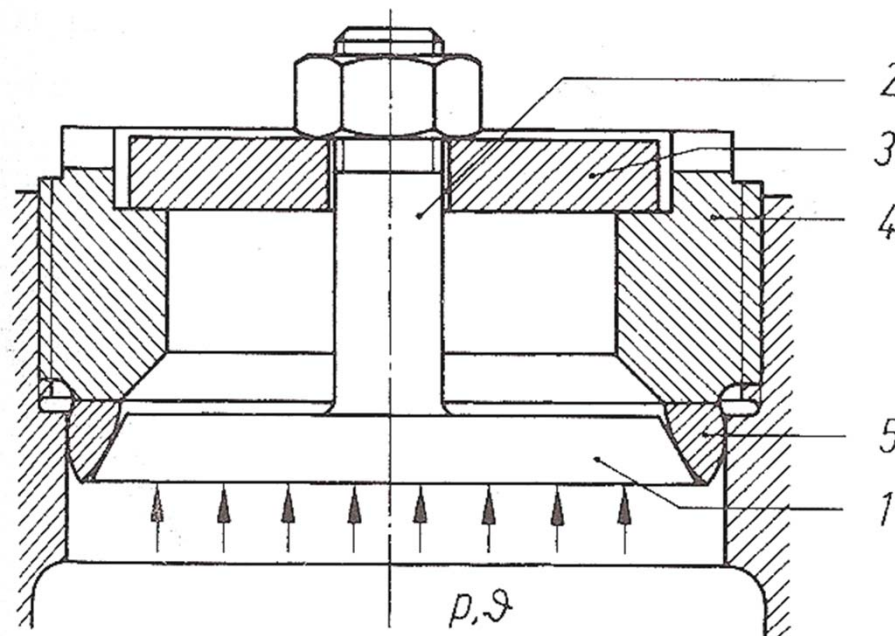
Das Zusammenspiel von Reibung und Hauptkraft wird ausgenutzt, um Klemmkräfte zu verstärken. Nach dem gleichen Prinzip arbeiten Fangvorrichtungen für Aufzüge.



Beispiel: Selbstspannende Riemenscheibe



Beispiel: Selbstverstärkende Dichtung (1)



U ... Ursprungswirkung

H ... Hilfswirkung

G ... Gesamtwirkung

Selbstdichtender Deckelverschluss

1 ... Deckel

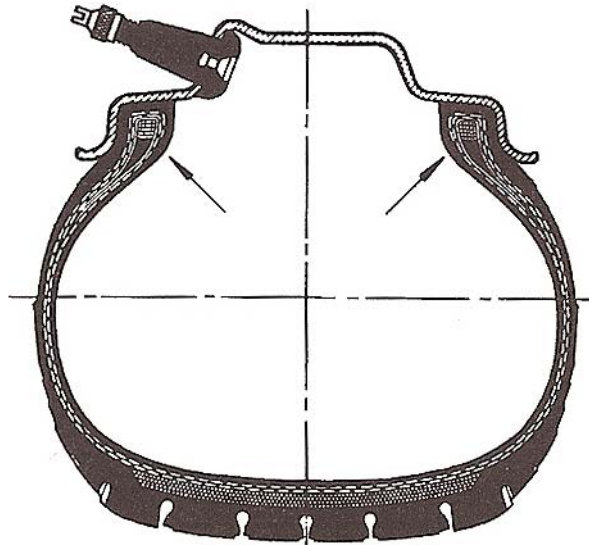
2 ... zentrale Schraube

3 ... Traverse

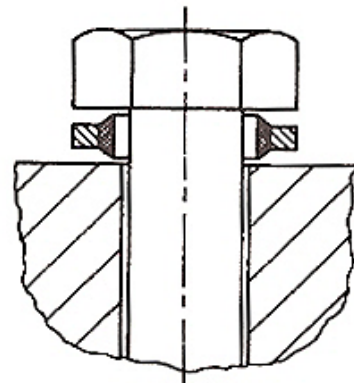
4 ... Gewindestück mit Sägezahnwinde

5 ... Metaldichtring

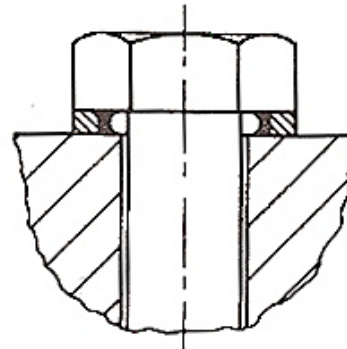
Beispiel: Selbstverstärkende Dichtung (2) – schlauchloser Autoreifen



Beispiel: Selbstverstärkende Dichtung (3) – selbstdichtende Unterlegscheibe

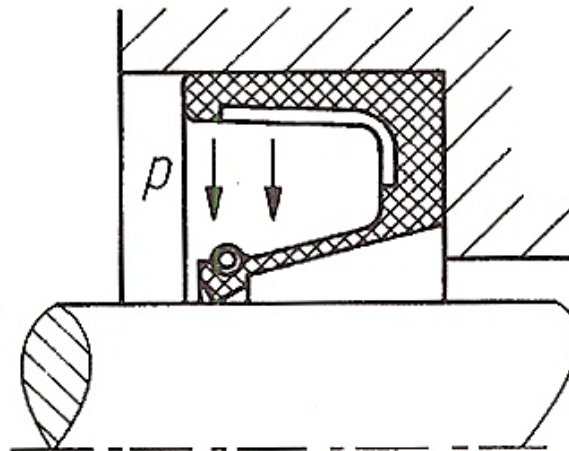


nicht angezogen

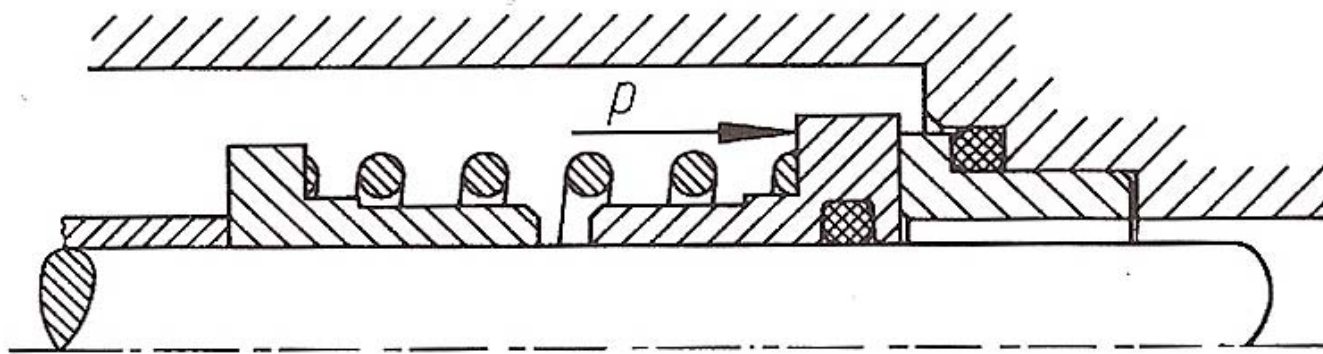


angezogen

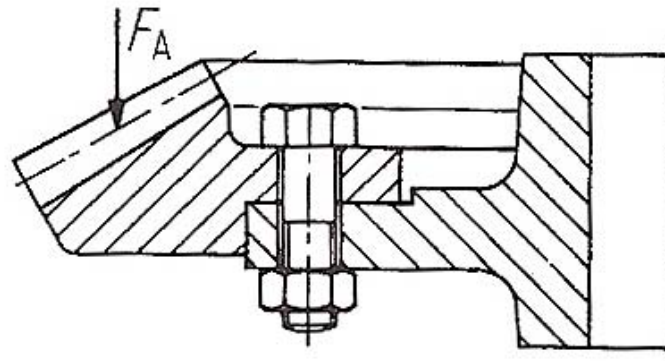
Beispiel: Selbstverstärkende Dichtung (4) – Radial-Wellendichtung (RWDR)



Beispiel: Selbstverstärkende Dichtung (5) – Manschettendichtung

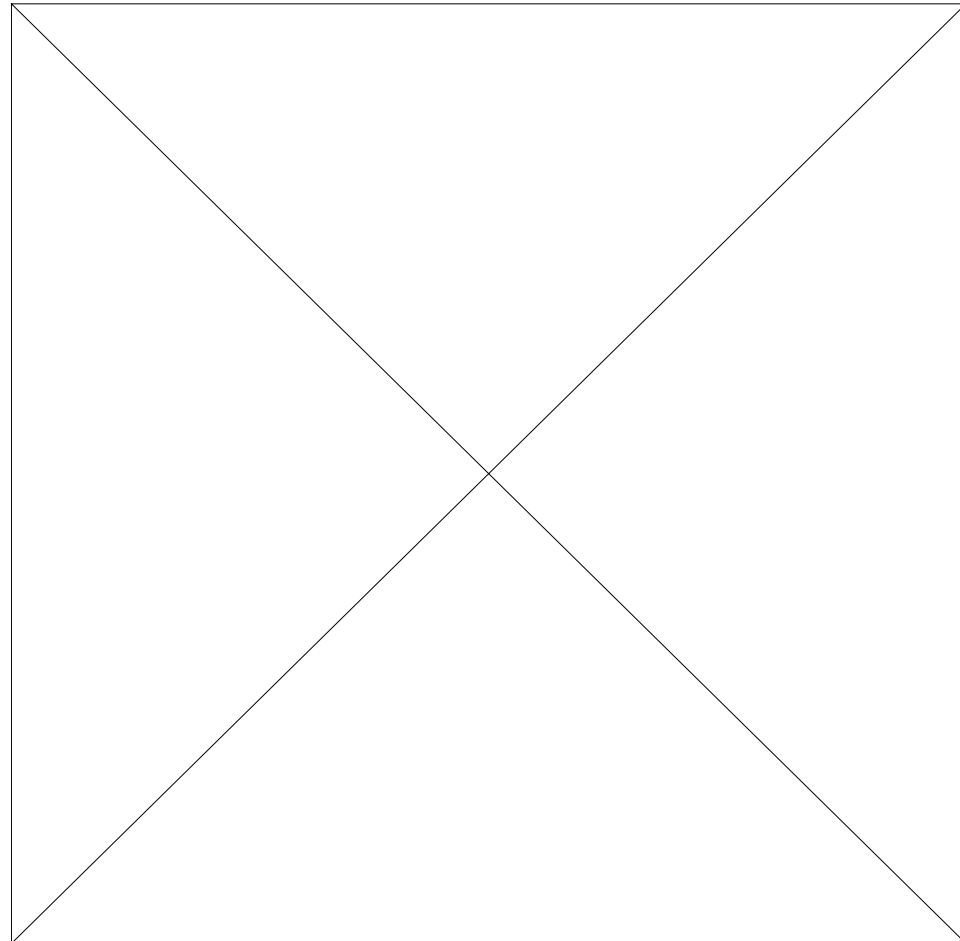
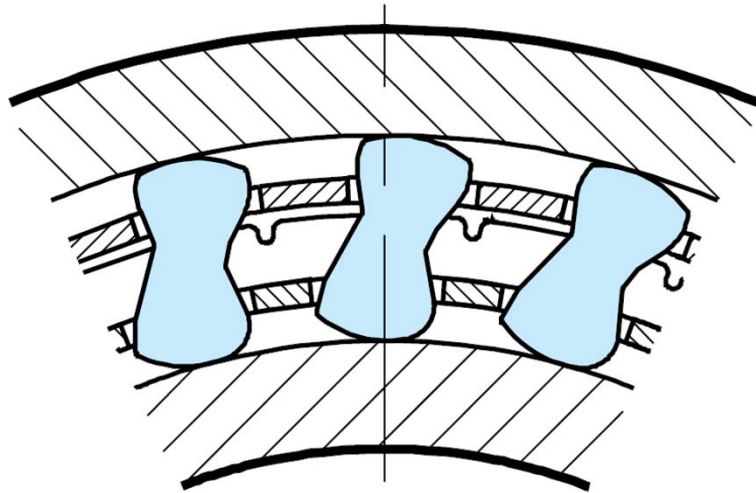


Beispiel: Reibschlüssige Verbindungen (1)



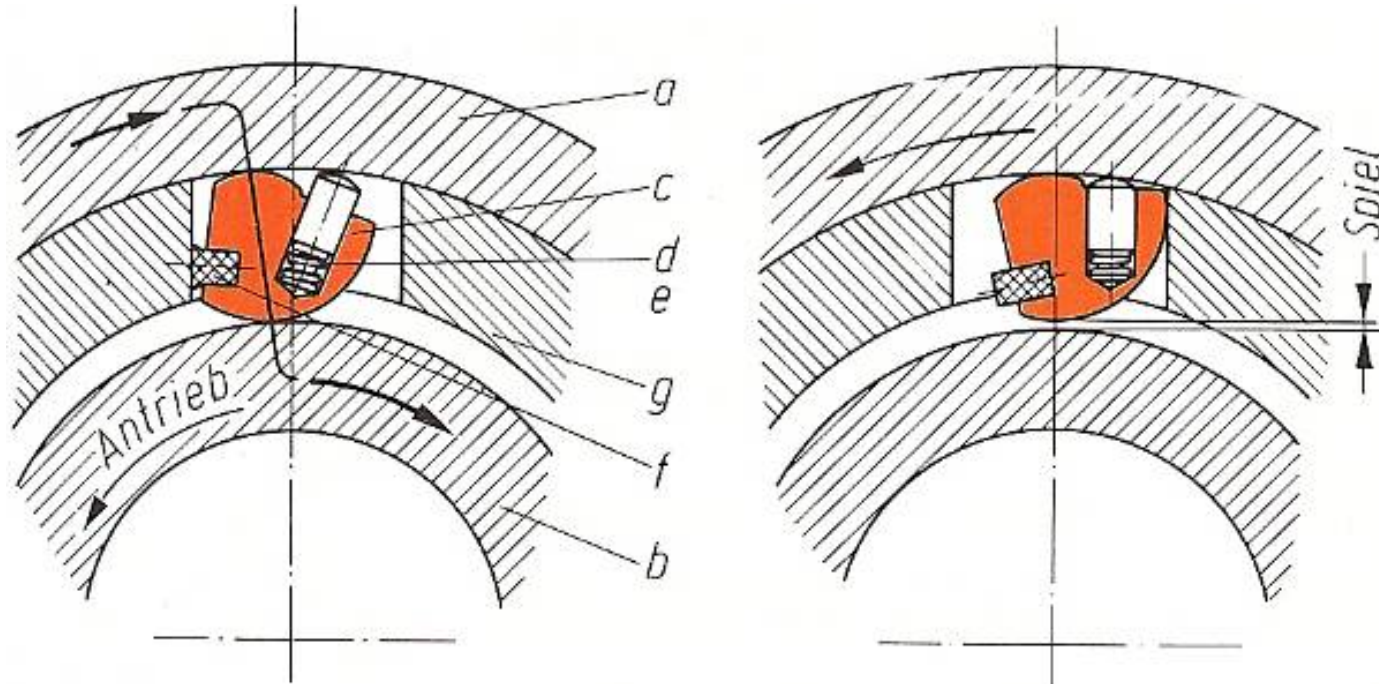
Tellerradbefestigung

Beispiel: Klemmkörper-Freilauf (1)



Klemmkörperkäfigfreilauf

Beispiel: Klemmkörper-Freilauf (2)



Prinzip einer Stieber-Freilaufkupplung (mit Klemmkörper)
links) Mitnahme des Außenrings
rechts) Freilauf

Beispiel: Klemmkörper-Freilauf (3)



Wälzlagerfreilauf

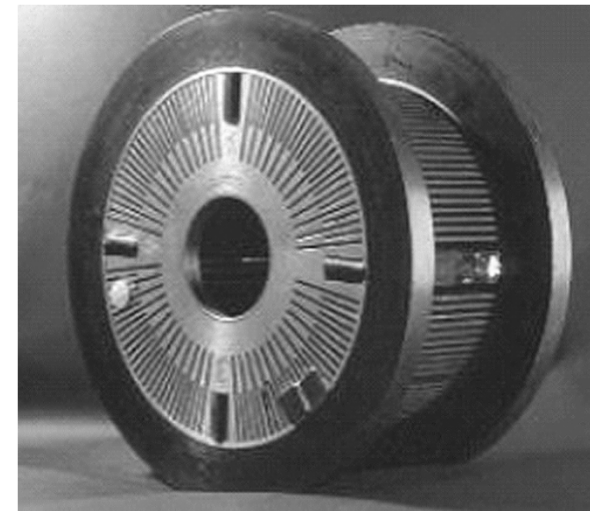
Beispiel: Hochgeschwindigkeits-Windsichter (1)

- Funktionsweise: Der Windsichter hat die Aufgabe ein Schüttgut (Sichtgut) mit unterschiedlichen Korngrößen in Grobgut und Feingut zu trennen. Bei einer engen Korngrößenverteilung kann auch ein Gemisch aus unterschiedlichen Materialien in eine Leicht- und eine Schwerfraktion getrennt werden.



Windsichter basierend auf Schwerkraft
(dient zur Erklärung der Funktionsweise)

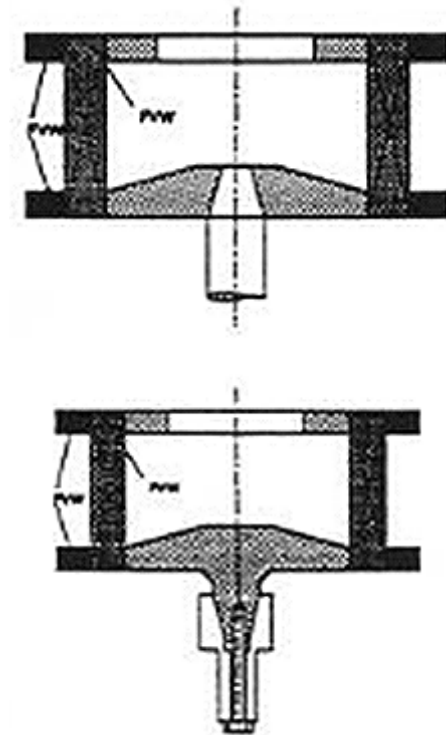
- Bei der im rechten Bild gezeigten Konstruktion werden unterschiedliche Werkstoffeigenschaften – in diesem Fall die Steifigkeit – genutzt, um eine Selbsthilfe des Spannungsverhaltens zu erzielen.



Hochgeschwindigkeits-Windsichter basierend auf Zentrifugalkraft

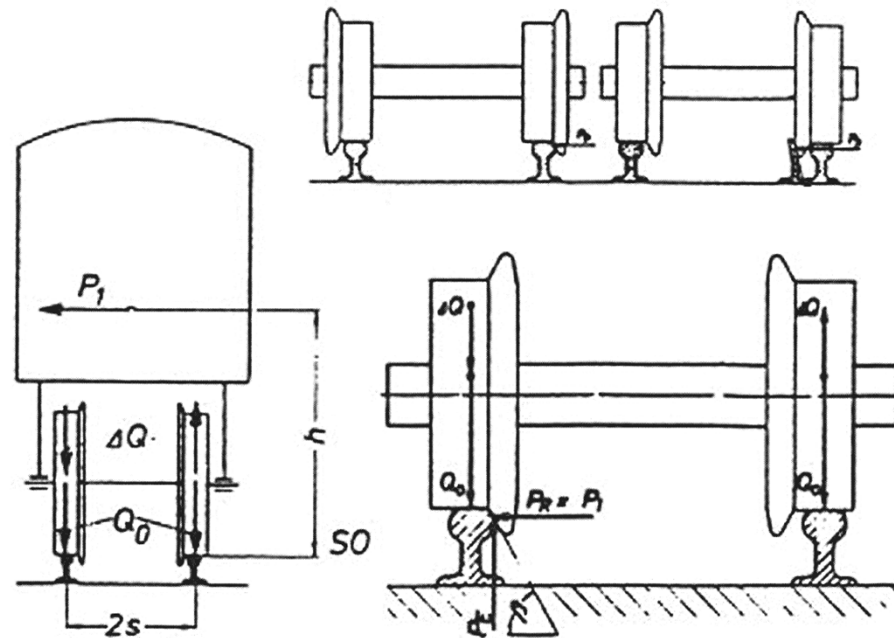
Beispiel: Hochgeschwindigkeits-Windsichter (2)

- Die Fliehkräfte der Lamellen und der Scheiben werden von aufgeschrumpften Ringen aus CFK übernommen. Diese weisen eine wesentlichen größere Steifigkeit gleichzeitig geringerem Gewicht auf.
- Auch die Welle-Nabe-Verbindung ist so angeordnet, dass die Fliehkräfte eine Verstärkung des Kegelpressverbandes bewirken.



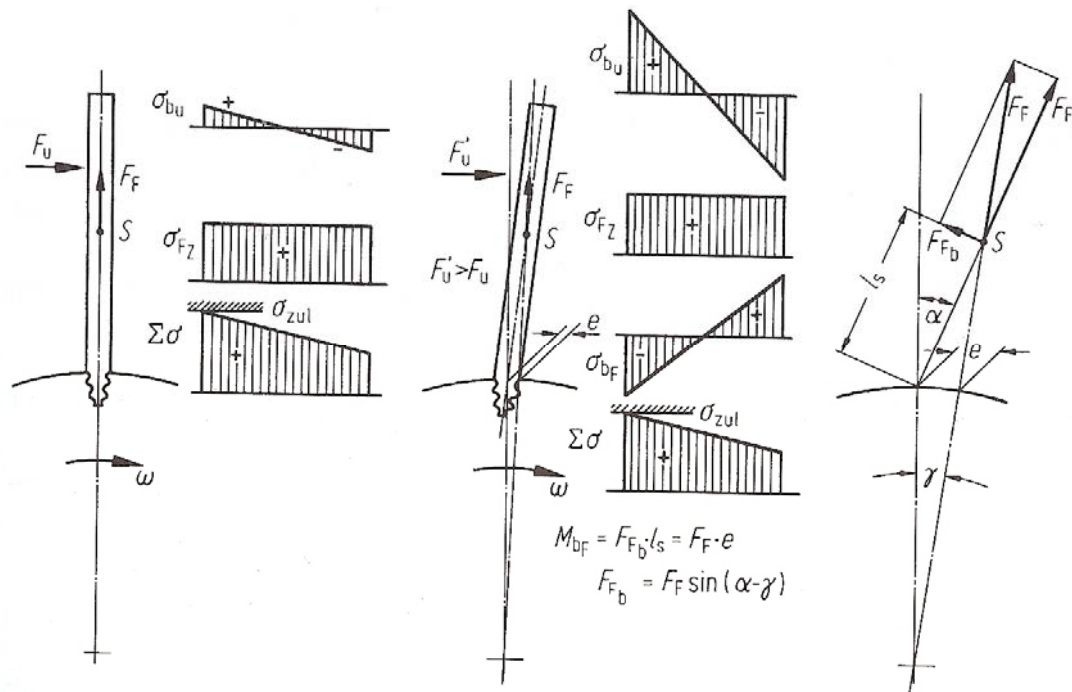
Beispiel: Spurführung

- Die Fliehkraft erzeugt einerseits eine Gegenkraft und andererseits eine Verstärkung der Reibkraft am Spurkranz



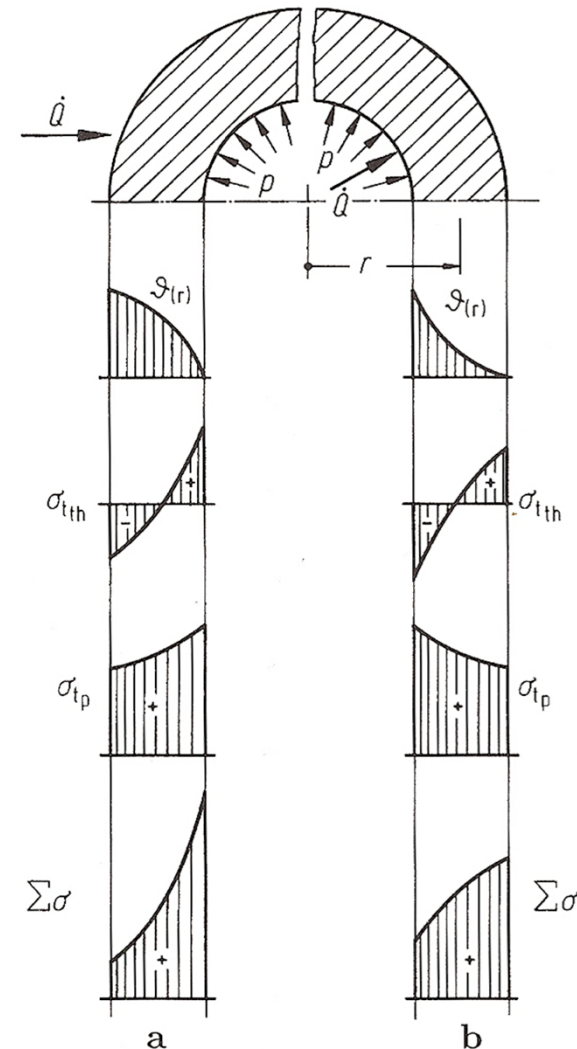
Beispiel: Selbstausgleichende Turbinenschaufeln

- Ausgenutzt wird die aus der Fliehkraft resultierende Biegebeanspruchung. Durch die Schrägstellung der Schaufeln wird der Schwerpunkt exzentrisch zur Rotationsebene verlagert. Entgegengesetzt zur Anströmung bewirkt die axiale Fliehkraftkomponente ein „Geradeziehen“ der Schaufel.



Beispiel: Spannungsausgleich in einem Behälterrohr

- Die aus Wärmespannungen und statischen Lasten resultierende Beanspruchung lässt sich häufig durch die Änderung der Lasteinleitung günstig beeinflussen. So ergibt sich die Tangentialkomponente der durch Innendruck hervorgerufenen Lastspannung positiv, also als Zugspannung. Dagegen ist die Wärmespannung an der Innenfaser bei radialer Wärmeleitung von innen nach außen eine Druckspannung, also negativ.

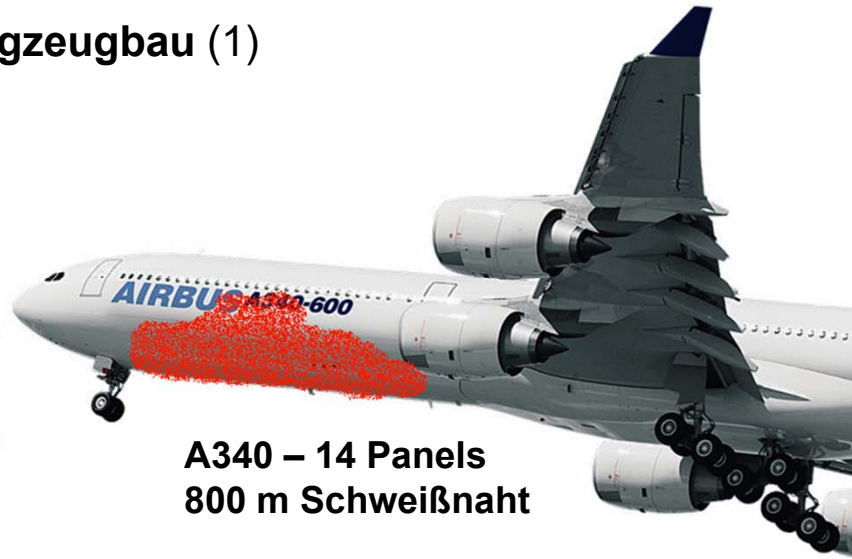


Beispiel: Schweißen im Flugzeugbau (1)

**A318 – 2 Panels
110 m Schweißnaht**



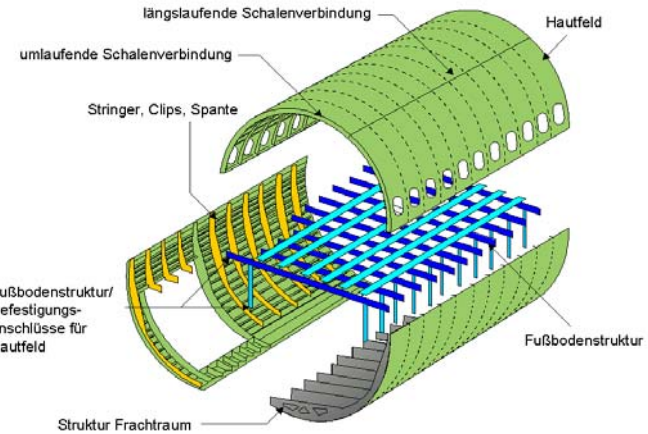
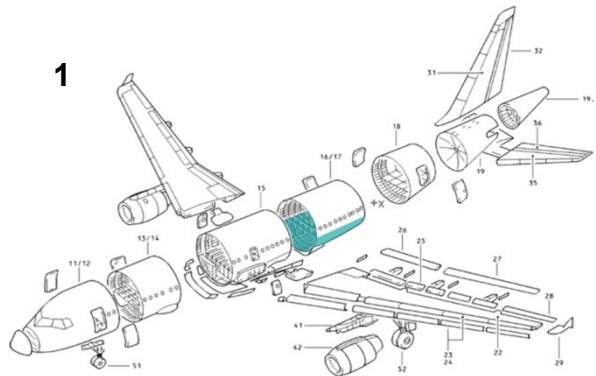
**A340 – 14 Panels
800 m Schweißnaht**



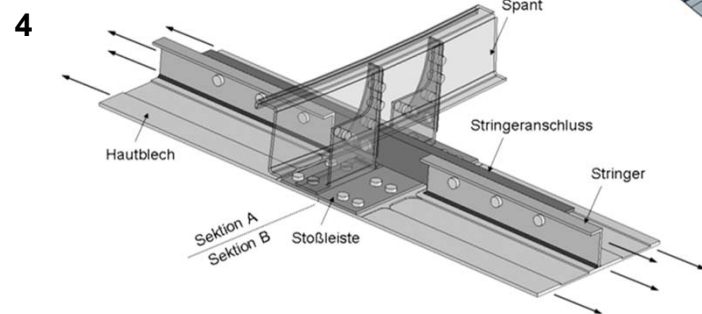
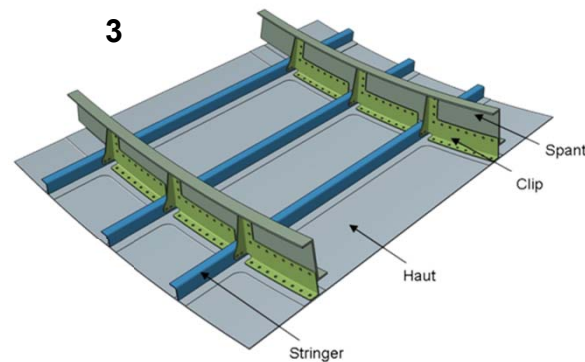
**A380 – 8 Panels
650 m Schweißnaht**



Beispiel: Schweißen im Flugzeugbau (2)



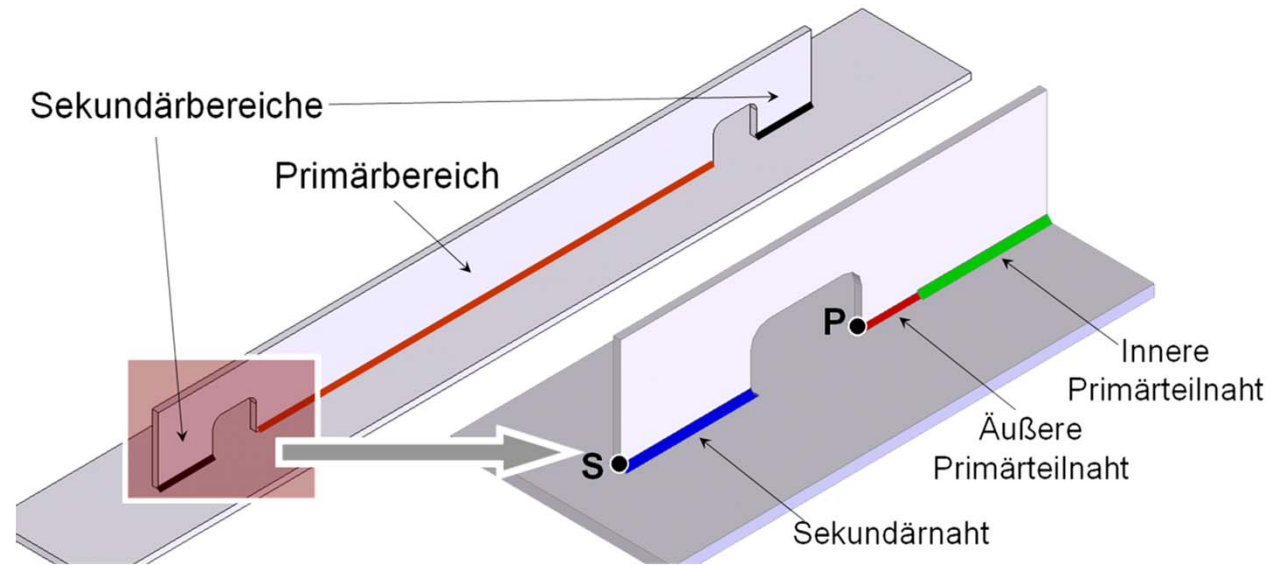
1. Gliederung der Flugzeugstruktur
2. Aufbau der Primärstruktur
3. Hautfeldstruktur
4. Stringerkupplung zur Verbindung der einzelnen Rumpfsektionen



Beispiel: Schweißen im Flugzeugbau (3)

- Ziel ist es, eine heißrissfreie Anbindung des Stringers am Hautfeld zu ermöglichen. Neben der Korrosionsgefahr geht von Heißrissen infolge ihrer spitzen Ausläufe eine hohe Kerbwirkung aus.
- Bei dem patentierten Integralen Ansatz wird der Stringer durch zwei Aussparungen in drei Bereiche geteilt, wobei der Primärbereich zu jedem Zeitpunkt die Gesamtbelastung aufnehmen muss. Hingegen dürfen die Sekundärbereiche Heißrisse aufweisen und versagen (→ Trennung von Stringer und Hautblech).
- Sowohl durch die geometrische Gestaltung als auch durch die Schweißfolge wird ein selbstverstärkender Effekt erzeugt, der lokal zu Verformungsbehinderungen und damit zur Heißrissunterdrückung an den Endbereichen des Primärbereichs führt.

Beispiel: Schweißen im Flugzeugbau (4)



Optimierung Bauteilverhalten

im Flugbetrieb

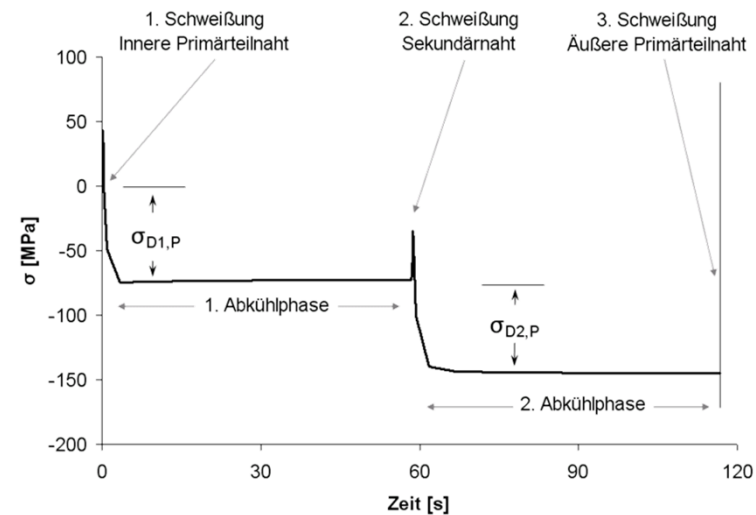
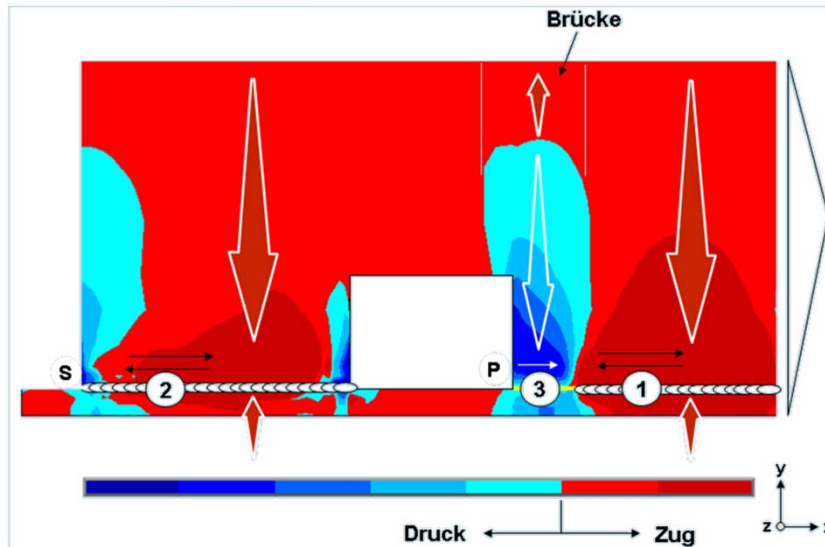
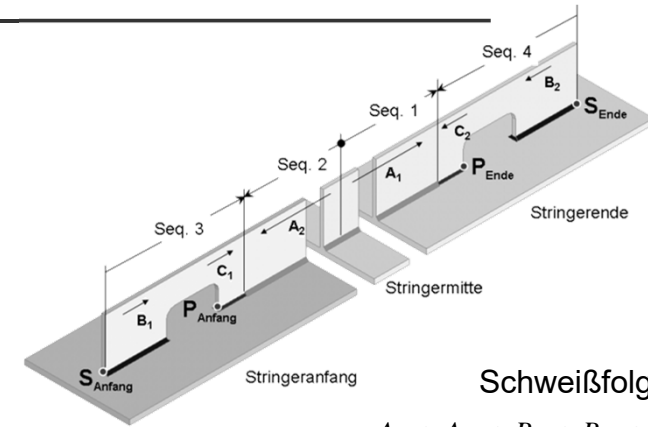
Reduzierung der Kerbspannungen in P durch vorgelagerte Sekundärbereiche

während Schweißprozess

Erhöhung der Heißrissrisiko in P durch vorgelagerte Sekundärbereiche und angepasste Schweißfolge

Beispiel: Schweißen im Flugzeugbau (5)

- Der Wirkmechanismus basiert auf Druck- und Zugeigenspannungen im Stringer. Eigenspannungen quer zur Schweißrichtung (y-Richtung) im Stringer resultieren aus den ersten beiden Teilschweißungen mit jeweils anschließender Abkühlungsphase.



Resultierende Druckeigenspannungen in P nach den ersten beiden Teilschweißungen (innere Primärteilnaht und Sekundärnaht)

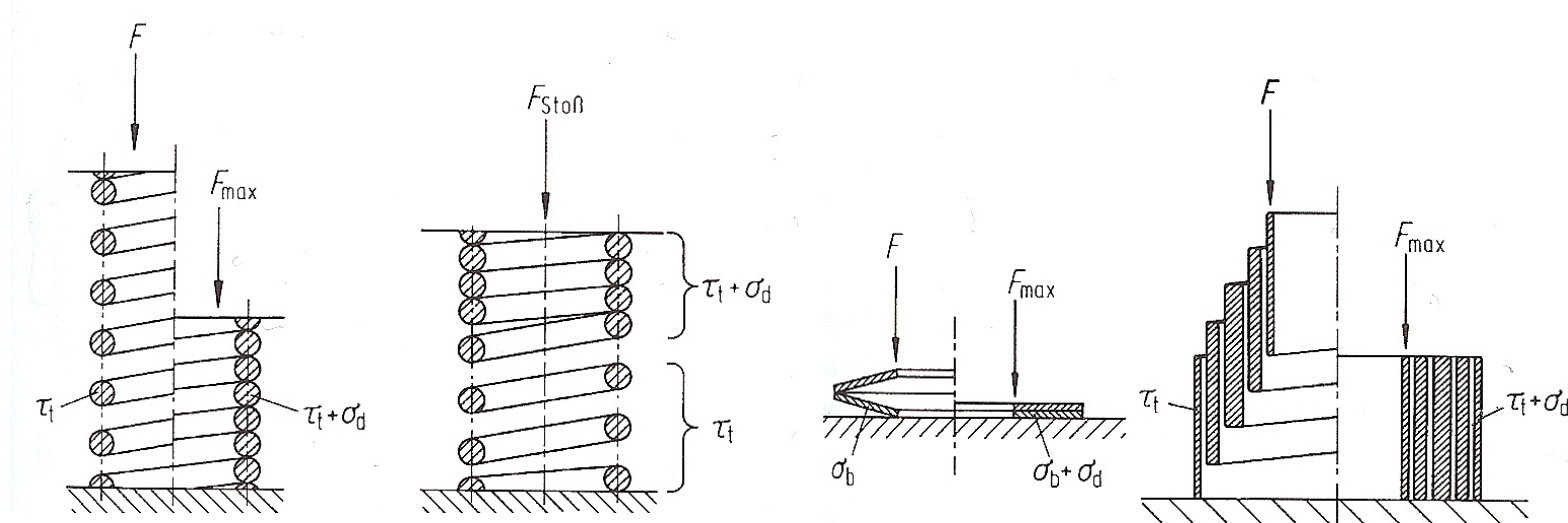
- Die Beispiele sollen anregen, die Wirkgrößen von technischen Systemen durch Anordnung und Gestaltung so zu wählen, dass
 - Kräfte und Momente mit ihren resultierenden Beanspruchungen sich aufheben
 - zusätzliche Kräfte oder Momente eine Leistungserhöhung ermöglichen

2.4 Selbstschützende Lösungen

- Zweck der selbstschützenden Lösungen ist die Verhinderung der Zerstörung im Überlastfall. In diesem Fall wird die Hilfswirkung entweder
 - aus einem anderen Kraftleitungsweg mittels *elastischer Verformung* gewonnen
 - oder durch *Unterbrechung* der Kraftleitung erzeugt.

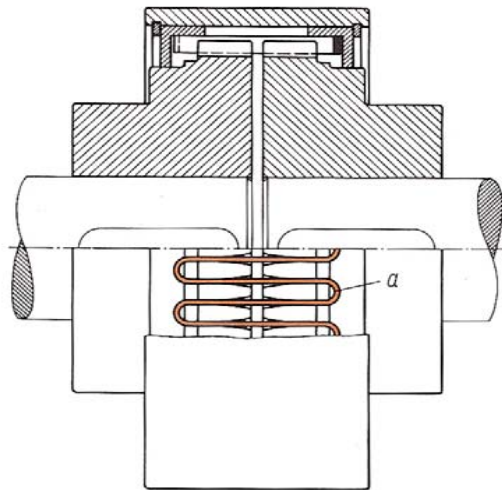
Beispiel: Elastische Verformung bei Federn (1)

- Infolge der elastischen Verformung entsteht eine andere Kraftflussverteilung und somit eine andere Beanspruchungsart, die insgesamt tragfähiger ist. Gleichzeitig werden jedoch die unter Normallast bestehenden funktionellen Eigenschaften geändert, eingeschränkt oder aufgehoben.

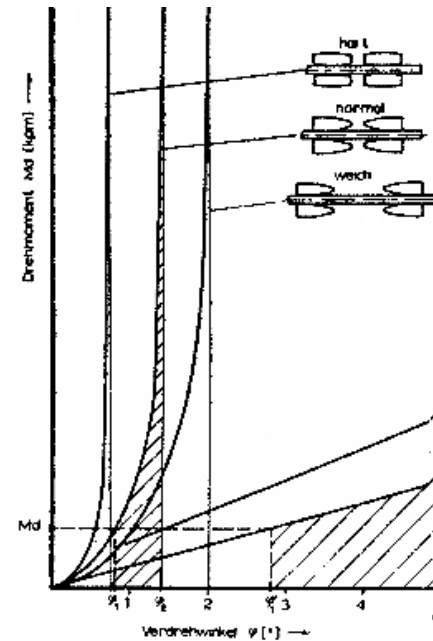
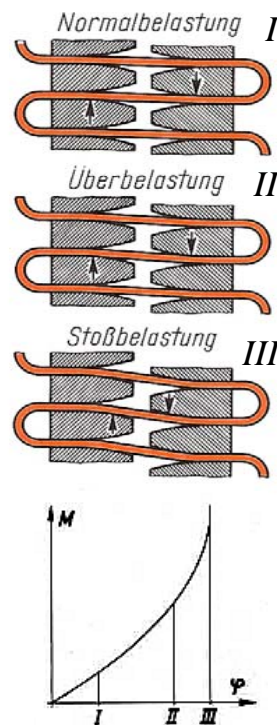


Beispiel: Elastische Verformung bei Kupplungen (1)

- Bei diesen Kupplungsarten können durch Verlust von Nachgiebigkeiten höhere Kräfte aufgenommen werden.



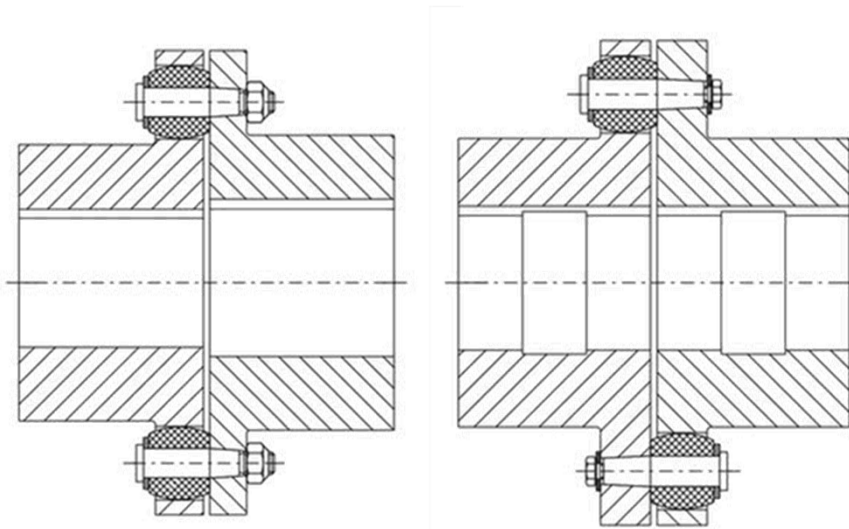
Bibby-Kupplung



- Zwei Naben verbunden durch schlangenförmiges Federband
- Trompetenförmige Nuten im Bereich der Kupplungsmitte
- progressive Federkennlinie
- III: drehstarr, Scherbeanspruchung der Federstabe
- Außendurchmesser bis 3.900 mm

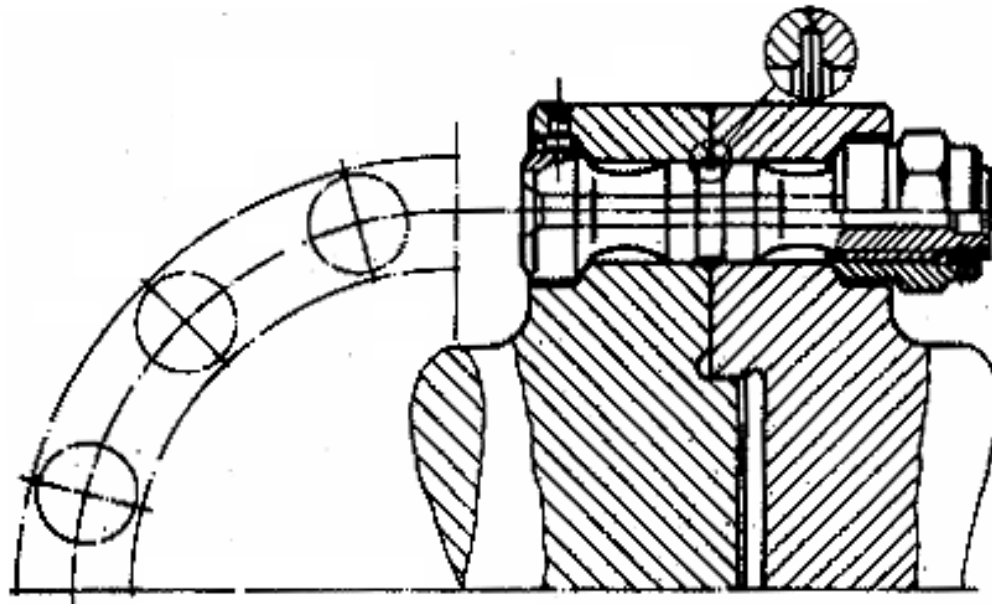
Beispiel: Elastische Verformung bei Kupplungen (2)

- Je nach Formgebung der Bolzen, werden unterschiedliche Federeigenschaften erzeugt.



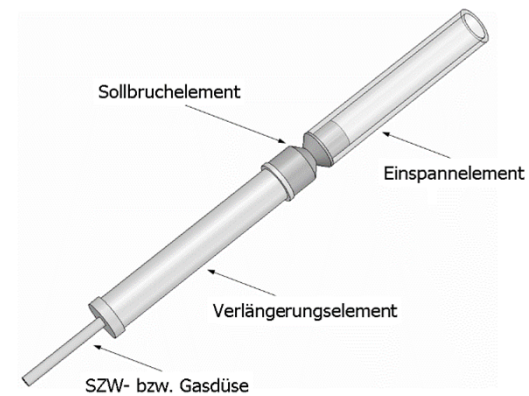
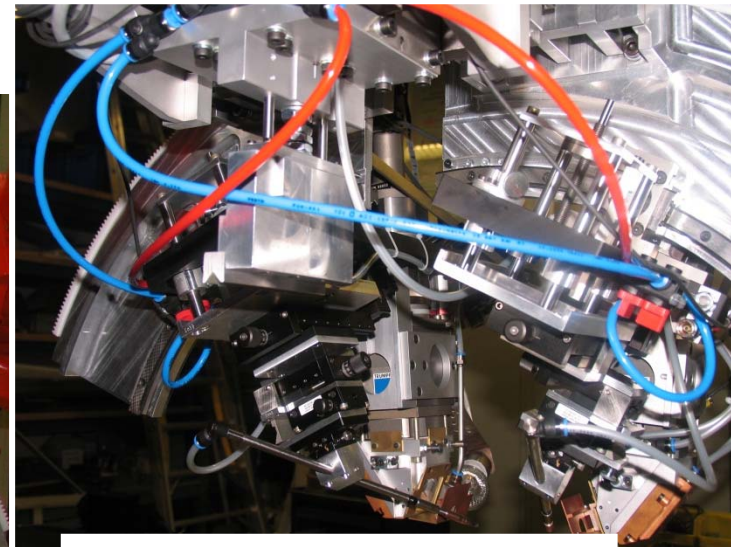
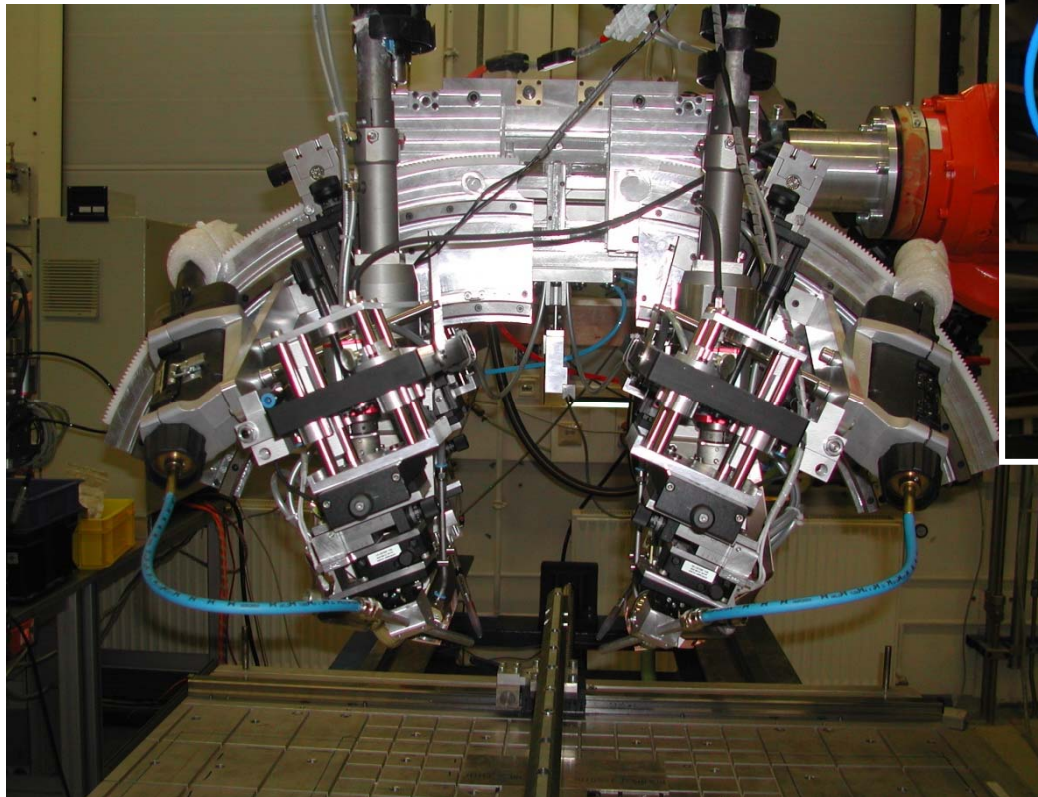
RUPEX-Kupplung (Flender)

Beispiel: Unterbrechung der Kraftleitung bei Kupplungen

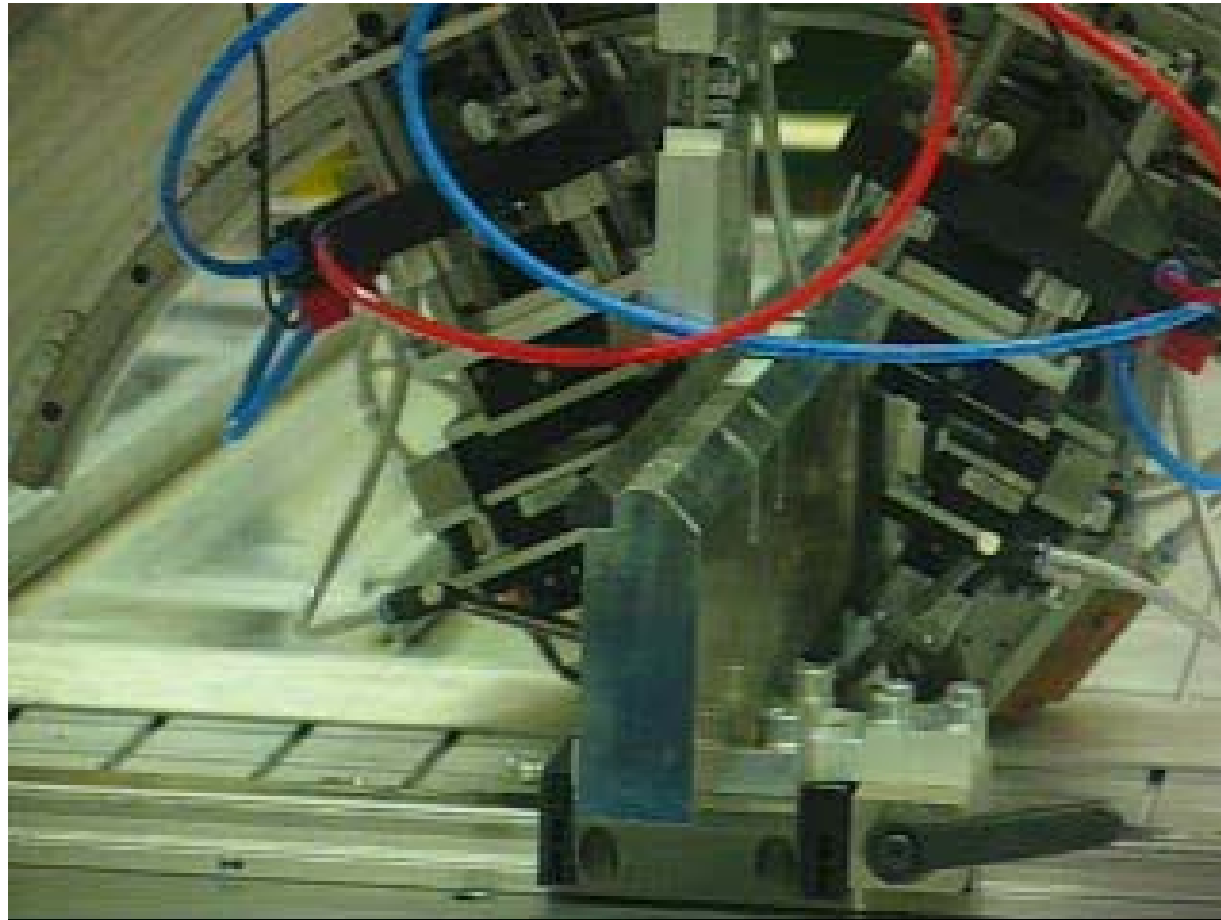


- Das nebenstehende Bild zeigt eine Flanschkupplung für hoch belastete Antriebe (Generatoranschluss). Die Bolzen sind als Scherbolzen ausgebildet und haben Spiel, um einen bestimmten Versagenspunkt einzustellen.

Beispiel: Unterbrechung der Kraftleitung bei einer Schweißgasdüse



Beispiel: Unterbrechung der Kraftleitung bei einer Schweißgasdüse



2.5 Prinzip der Stabilität und Bistabilität

- Bei der Einwirken einer Störung auf ein System wird im Systemverhalten unterschieden zwischen:

System kehrt nach einer Störung von selbst in die alte Lage mit vorherigem Gleichgewichtszustand zurück

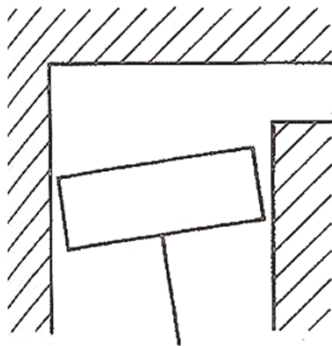
System nimmt nach einer Störung eine neue Lage mit verändertem Gleichgewichtszustand ein

System nimmt nach der Störung eine neue Lage mit neuem Gleichgewichtszustand ein

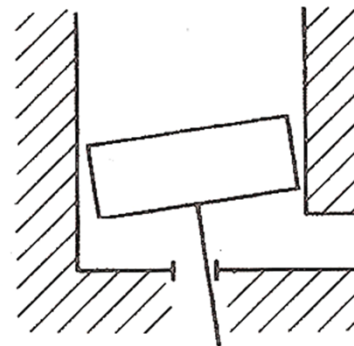
2.5.1 Prinzip der Stabilität

- Das Konstruktionssystem hat die Eigenschaft, nach Auftreten von Störungen wieder den alten Betriebszustand „einzuregulieren“. Die Gestaltung ist dabei so vorzunehmen, dass Störungen eine sich selbstaufhebende oder zumindest mindernde Wirkung haben.

Beispiel – Kolbenführung

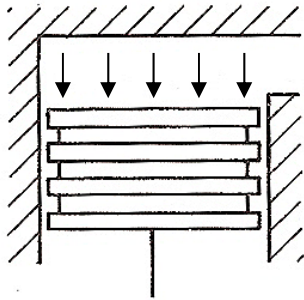


Die Anordnung der Pleuellager auf der druckabgewandten Seite verstärkt die Störung.

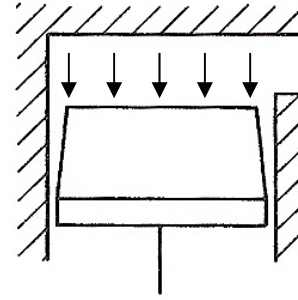


Die Anordnung der Pleuellager der Druckseite ergibt eine Kraftwirkung, die der Störung entgegenwirkt.

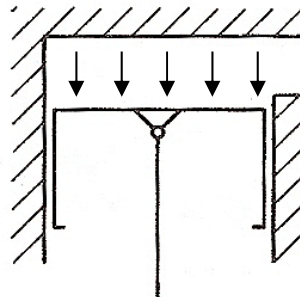
Beispiel – Kolbenführung (2)



abgeschwächte
labile Wirkung durch:



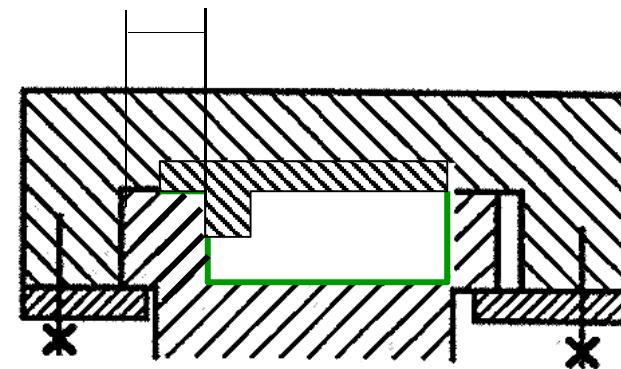
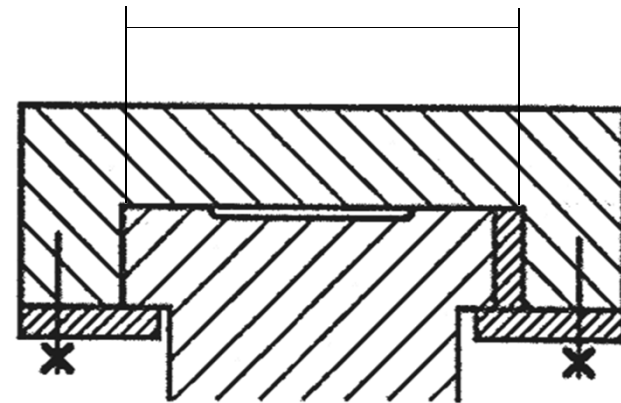
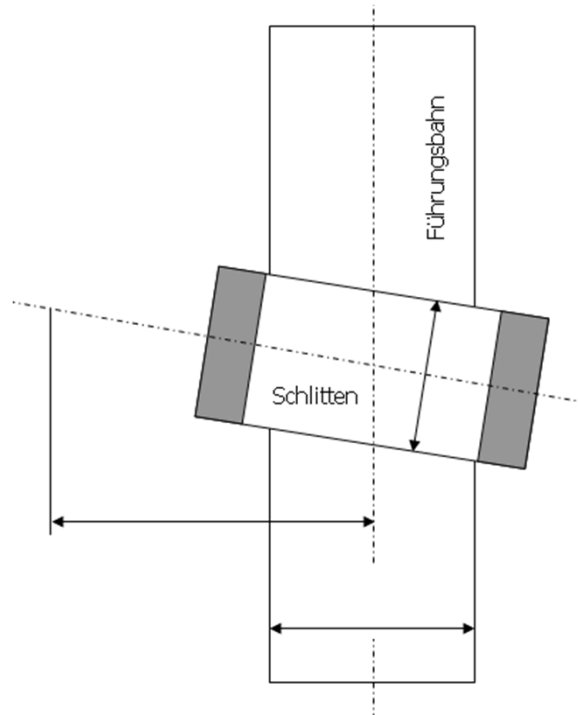
stabiles Verhalten
durch:



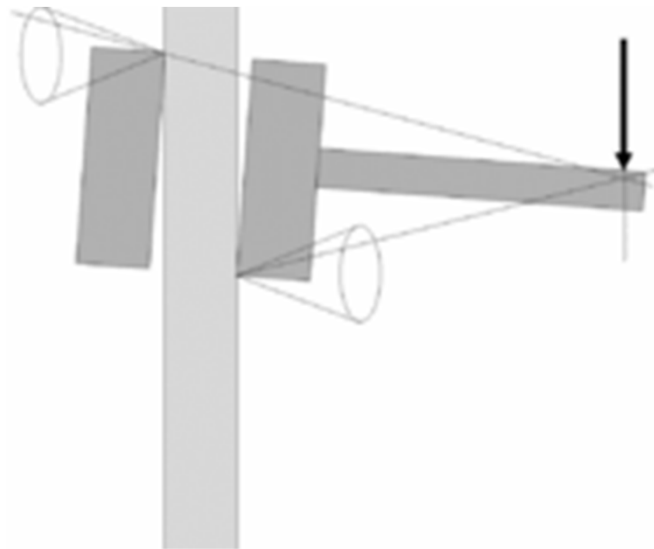
stabiles Verhalten ,
indem die
Krafteinleitung
oberhalb des
Schwerpunktes
erfolgt.

Beispiel – Schubladeneffekt (1)

- Der Effekt des Verkantens tritt bei exzentrischer Kraftleitung auf.



Beispiel – Schubladeneffekt (2)



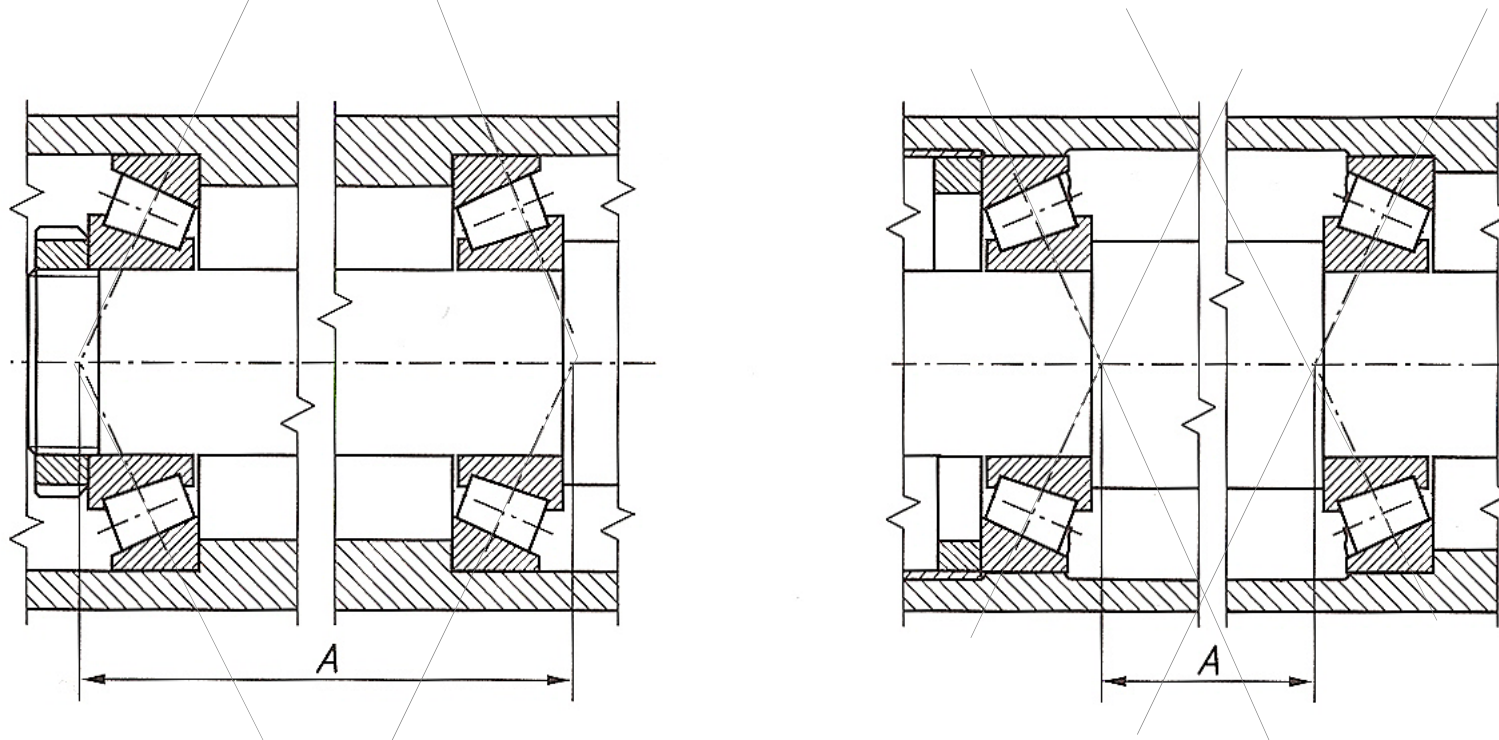
Beispiel – Schubladeneffekt (3)

- Gleichzeitig gibt es Anwendungen, bei denen dieser Effekt erwünscht ist.



Schraubzwinde

Beispiel – Kegelrollenlager (1)

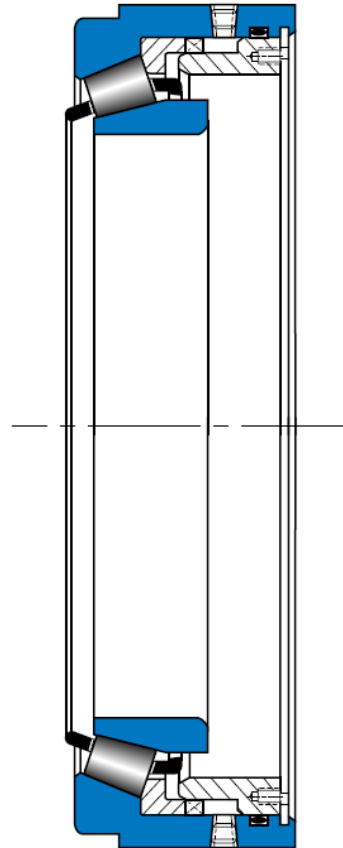


Angestellte Lagerungen, links) O-Anordnung, rechts) X-Anordnung

Beispiel – Kegelrollenlager (2)

- O-Anordnung:
 - geeignet zur Abstützung großer Kippmomente, da große Stützweite (z.B. bei Schrägverzahnungen).
- X-Anordnung:
 - haben einen kurzen rechnerischen Lagerabstand, eignen sich daher für steife Lagerungen und Aufnahme hoher Radialkräfte
 - axiale Verspannung führt zu Klemmen
Empfehlung: Lager mit Spiel einstellen

Beispiel – Kegelrollenlager (3)

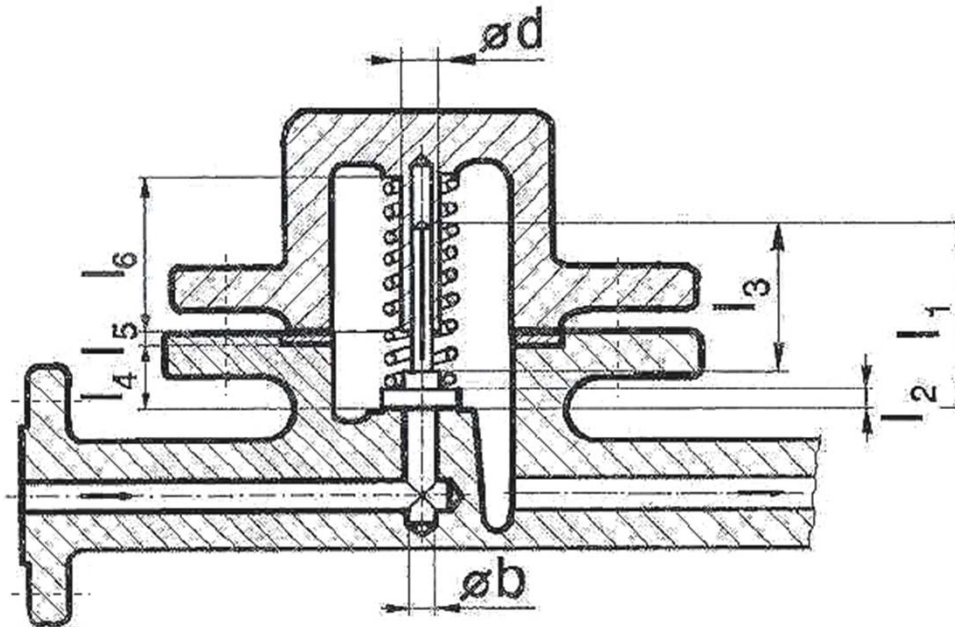


Hydra-Rib-Lager

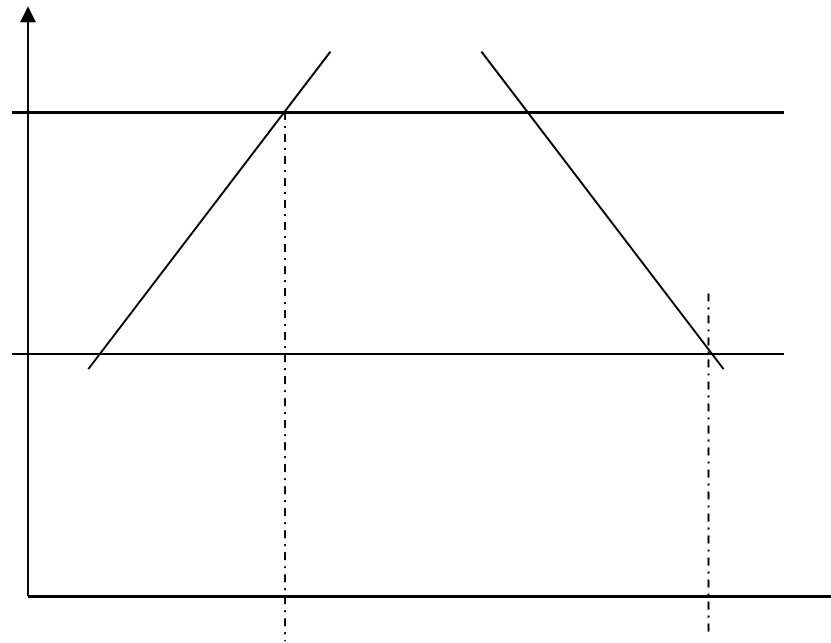
2.5.2 Prinzip der Bistabilität

- Dieser Zustand tritt ein, wenn bei Erreichen eines Grenzzustandes aus einem stabilen Zustand ein neuer, deutlich abgegrenzter stabiler Zustand erreicht wird und (labile) Zwischenzustände unerwünscht sind.

Beispiel – Überdruckventil (1)



Beispiel – Überdruckventil (2)



Beispiel – Überdruckventil (3)

- Anforderungen an die Feder
 - 1.) Die Druckfeder muss bei einer vorgegebenen Länge eine bestimmte Kraft aufbringen.
 - 2.) Beim Öffnungsweg ist die Kraftzunahme festgelegt, woraus sich eine erforderliche Federsteifigkeit ergibt.
 - 3.) Die Feder muss auf den Dorn passen und soll wegen der Gefahr des Ausknickens einen Innendurchmesser annähernd dem Dorndurchmesser haben.

Beispiel – Überdruckventil (4)

$$l_1 = 24mm$$

$$l_2 = 4mm$$

$$l_3 = 18mm$$

$$l_4 = 8mm$$

$$l_5 = 2mm$$

$$l_6 = 22mm$$

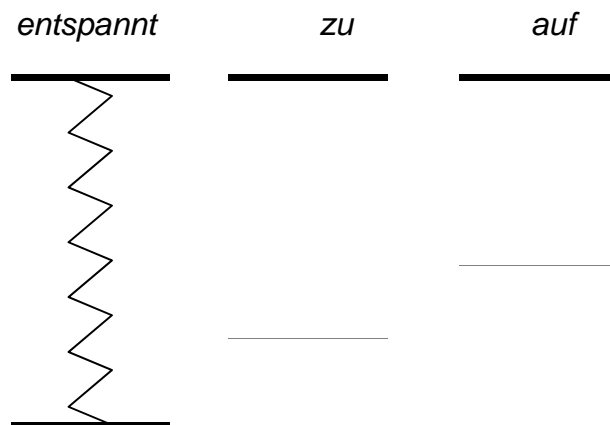
$$d = 8mm$$

$$b = 4mm$$

$$p_0 = 1,73N / mm^2$$

- Auslegung der Feder

-Analyse der Feder-
zustandslängen



Beispiel – Überdruckventil (4)

$$l_1 = 24mm$$

$$l_2 = 4mm$$

$$l_3 = 18mm$$

$$l_4 = 8mm$$

$$l_5 = 2mm$$

$$l_6 = 22mm$$

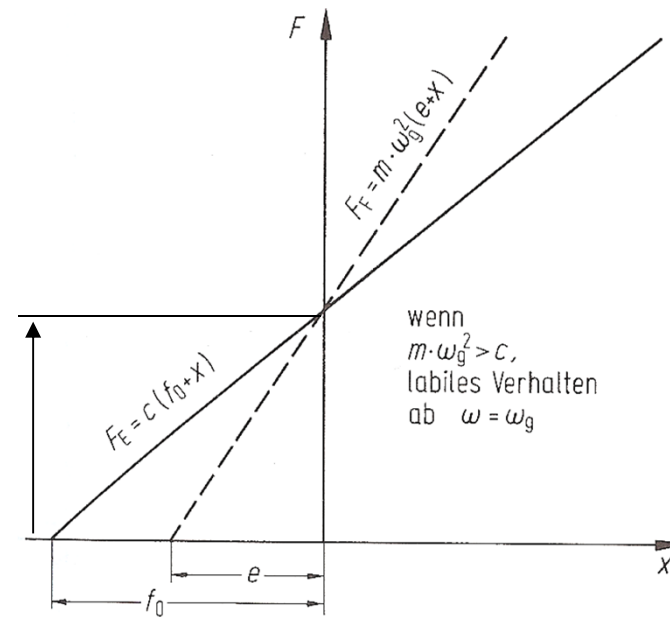
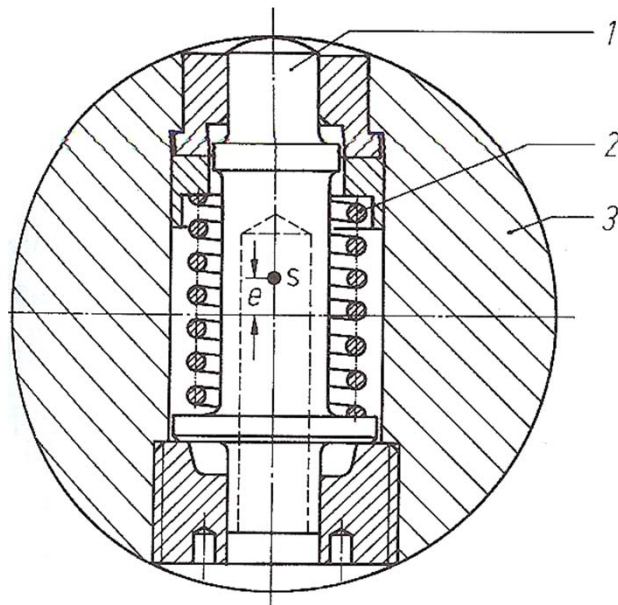
$$d = 8mm$$

$$b = 4mm$$

$$p_0 = 1,73N / mm^2$$

- Ermittlung des tatsächlichen Druckbereichs unter Berücksichtigung der Toleranzen von $\pm 0,1mm$.

Beispiel – Schnellschlussbolzen (1)



Schnellschlussbolzen 1 in Welle 3 mit um e exzentrisch liegendem Schwerpunkt S und Feder 2, die den Bolzen in Ruhelage hält

Beispiel – Schnellschlussbolzen (2)

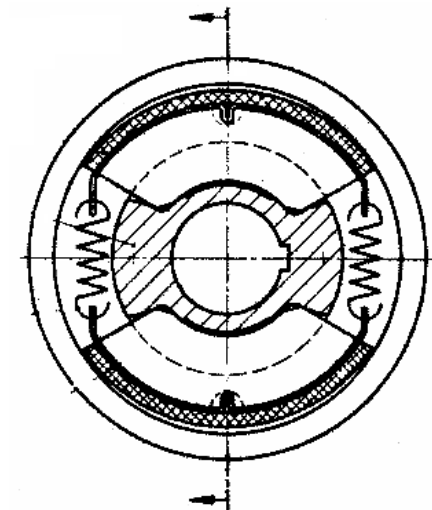
- Bei einer bestimmten Drehzahl beginnt der Bolzen infolge der höheren Fliehkraftwirkung gegen die Federvorspannung nach außen zu wandern bis er auf seinem Bund aufsitzt. Er tritt auf eine Klinke, die ihrerseits die Schnellschlussbetätigung der Einlassorgane auslöst bzw. wegen zu hoher Drehzahl die Abschaltung der Maschine in Gang setzt.

Beispiel – Zentrifugalkupplungen (1)

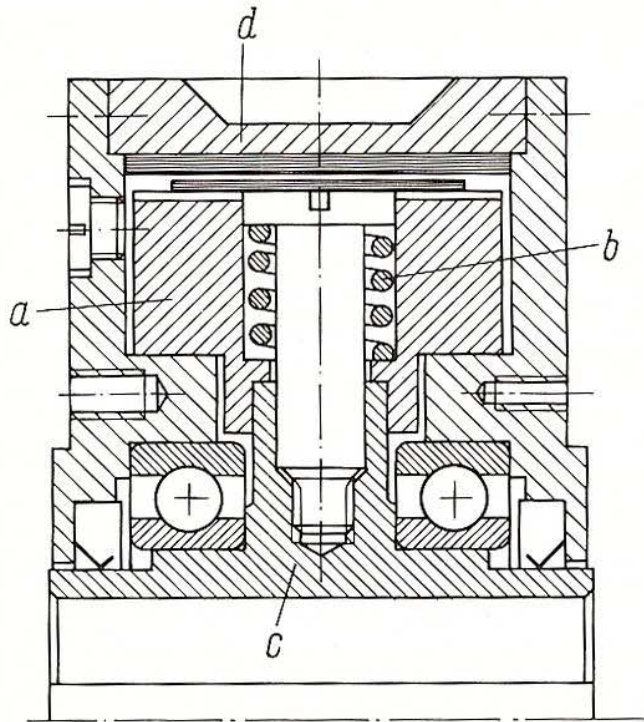
- Die Betätigung der Kupplung geschieht meist durch Ausnutzen der Fliehkraft. Fliehkörper oder Füllgut sind formschlüssig mit der Nabe verbunden und übertragen reibschlüssig auf die Kupplungsglocke.



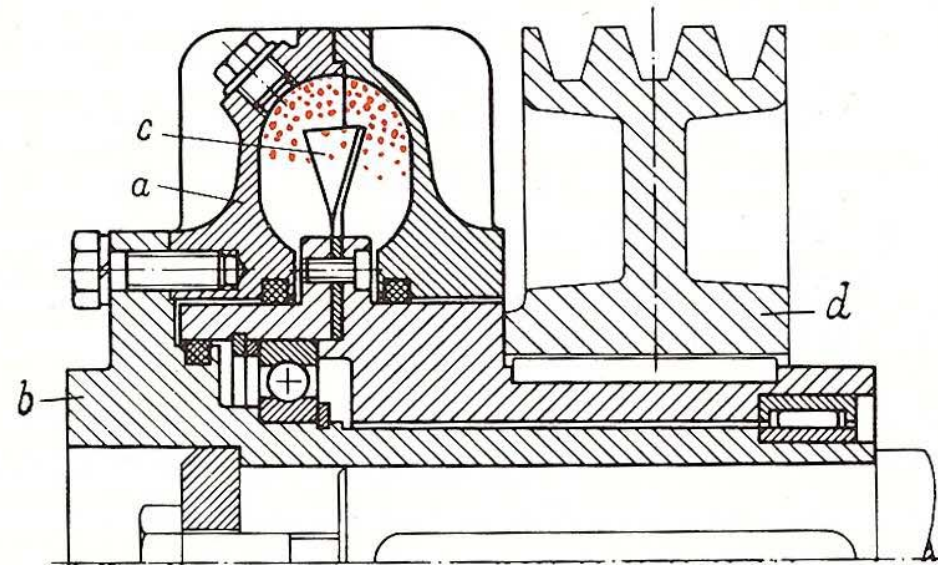
3-Backen-Fliehkraftkupplung



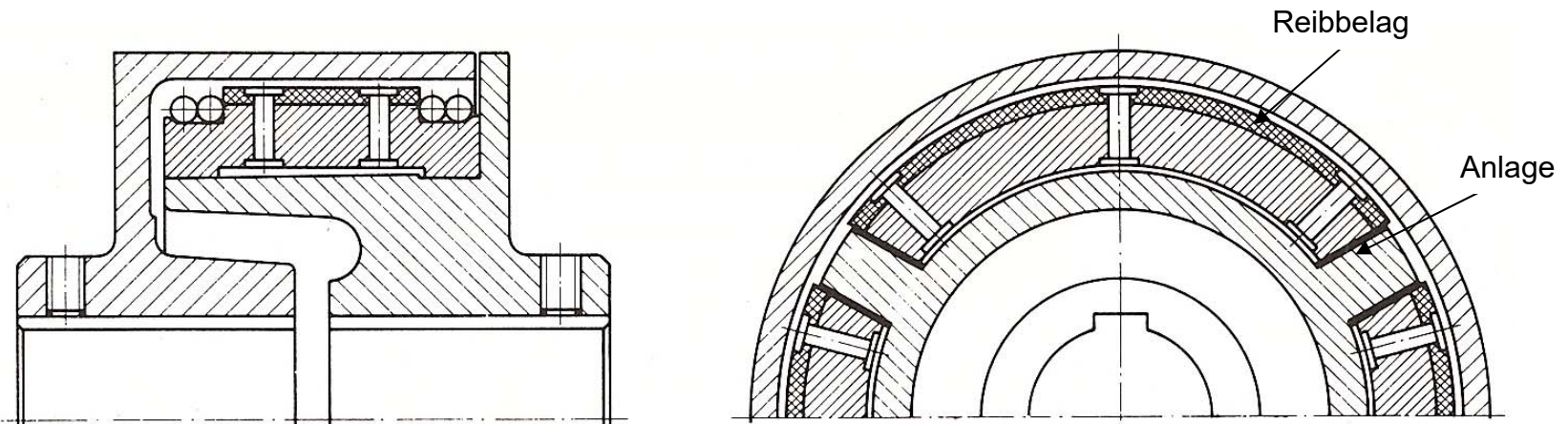
2-Backen-Fliehkraftkupplung



Backen-Fliehkraftkupplungen

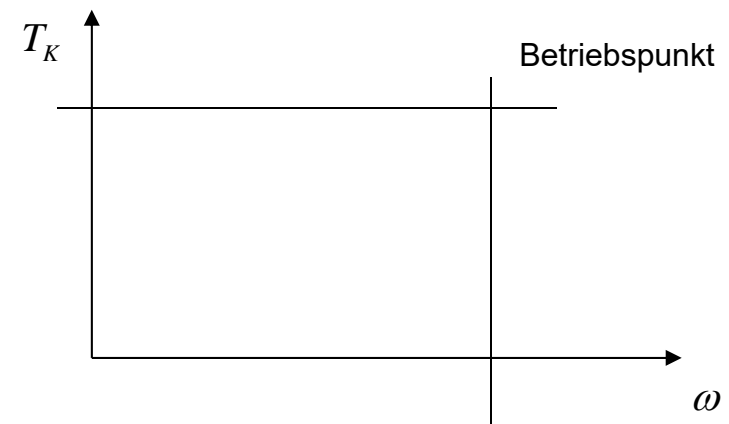
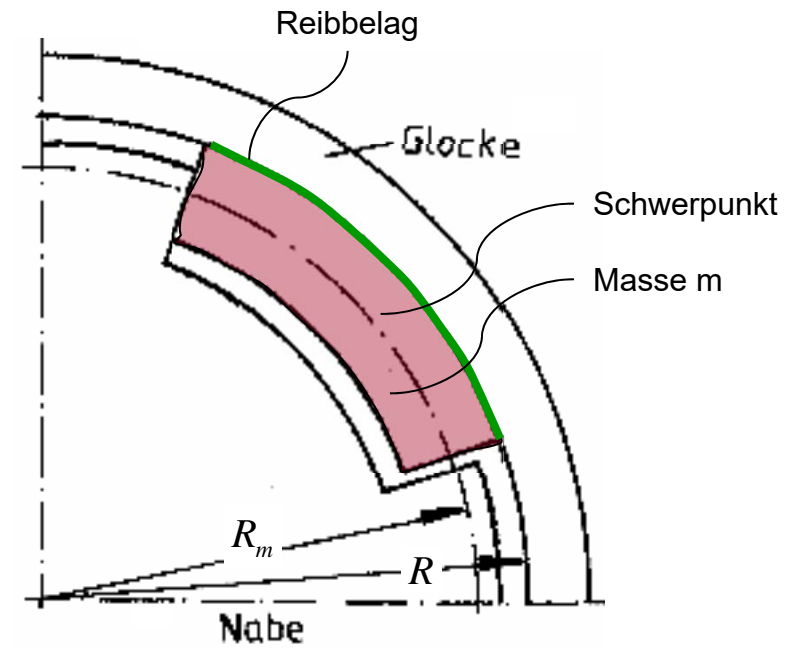


Rigamat-Anlaufkupplung
(mit Granulat)



Wüfel-Fliehkraft-Kupplung

Berechnung:



- i ... Anzahl der Fliehgewichte
- m ... Masse des Fliehgewichts
- R_m ... Radius des Massenschwerpunkts

3 Sichere und zuverlässige Gestaltung konstruktiver Systeme

3.1 Technische Bewertung der Begriffe Sicherheit und Risiko

- Entwicklung und Einsatz von Technik bringen neben der erwarteten Chancen stets auch Risiken. In der Technik gibt es prinzipiell keine absolute Sicherheit. Die Minimierung des unvermeidlichen Risikos ist eine anspruchsvolle technische und analytische Aufgabe.
- Mittels der Begriffe Sicherheit und Risiko kann die Zuverlässigkeit einer technischen Funktion als auch die Gefahrenminderung für Mensch und Umwelt beschrieben werden.
- Nach DIN 31004 werden die Grundbegriffe wie folgt definiert:

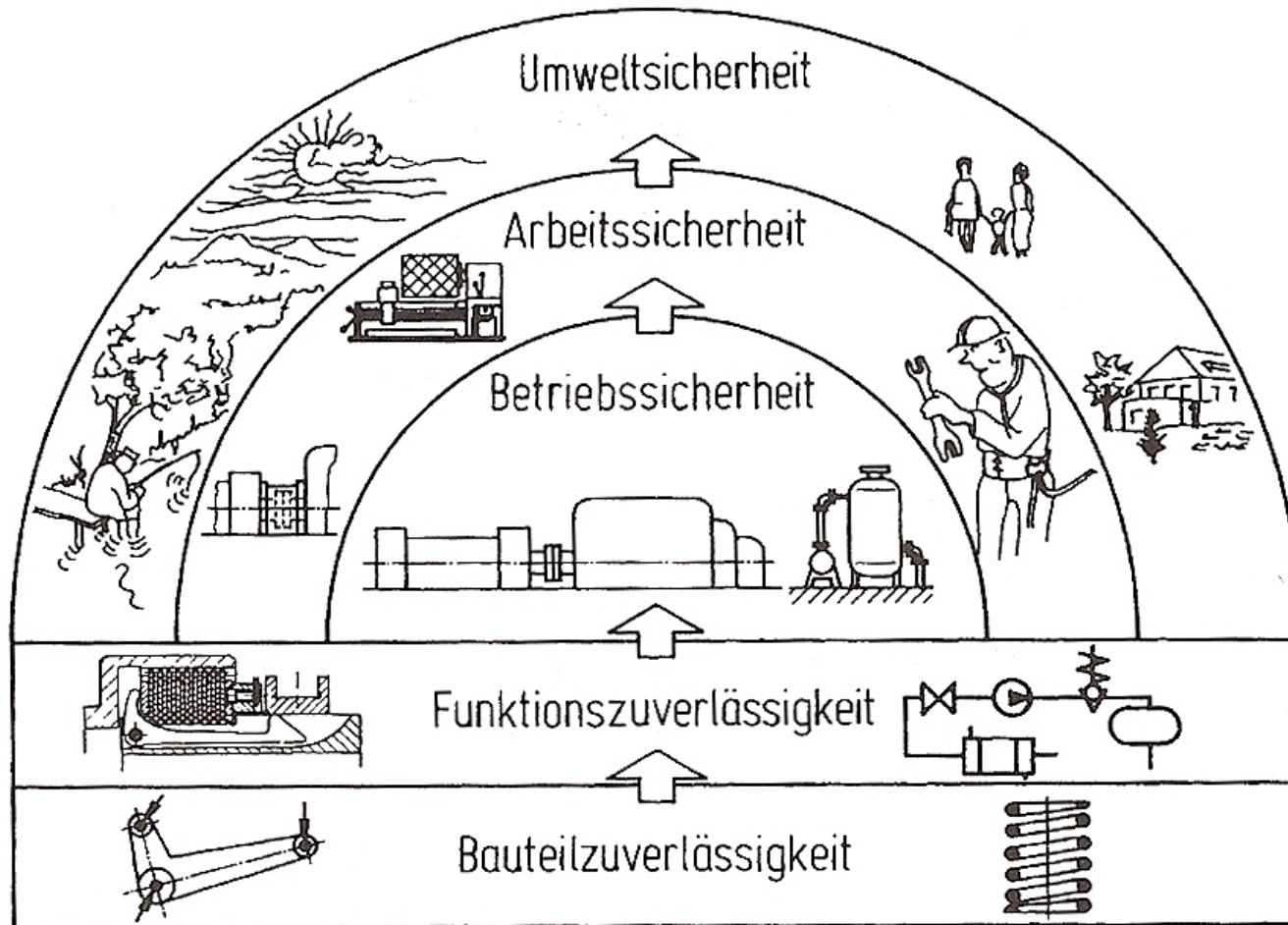
- Sicherheit** ist die Sachlage, bei der das Risiko kleiner als das Grenzkrisiko ist.
- Grenzkrisiko** ist das größte noch vertretbare anlagenspezifische Risiko eines bestimmten technischen Vorgangs.
- Risiko** wird durch die Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) und durch den erwarteten Schadensumfang (Tragweite) beschrieben.
- Zuverlässigkeit** ist die Verringerung des Risikos durch geeignete Vorkehrungen, die entweder die Eintrittshäufigkeit oder den Umfang des Schadens oder beides verringern.
- Verfügbares** ist das Verhältnis der Zeit, in der das System ordnungsgemäß zur Verfügung steht, zur Kalenderzeit oder zu einer bestimmten Sollzeit. Sie stellt das Maß der Zuverlässigkeit von Systemen dar.

- Grundlage der Gewährleistung von Sicherheit und Zuverlässigkeit für den Betrieb einer Anlage, für die Arbeitssicherheit und die Umweltsicherheit sind die Bauteilzuverlässigkeit und die Funktionszuverlässigkeit der Maschine oder eines Schutzsystems.
- Bezüglich der Bereiche, in denen auf Sicherheit geachtet werden muss, unterscheidet man zwischen:

Betriebssicherheit umfasst die Einschränkungen von Gefährdungen (Verminderung des Risikos) beim Betrieb von technischen Systemen, so dass diese selbst oder ihre unmittelbare Umgebung keinen Schaden erleiden.

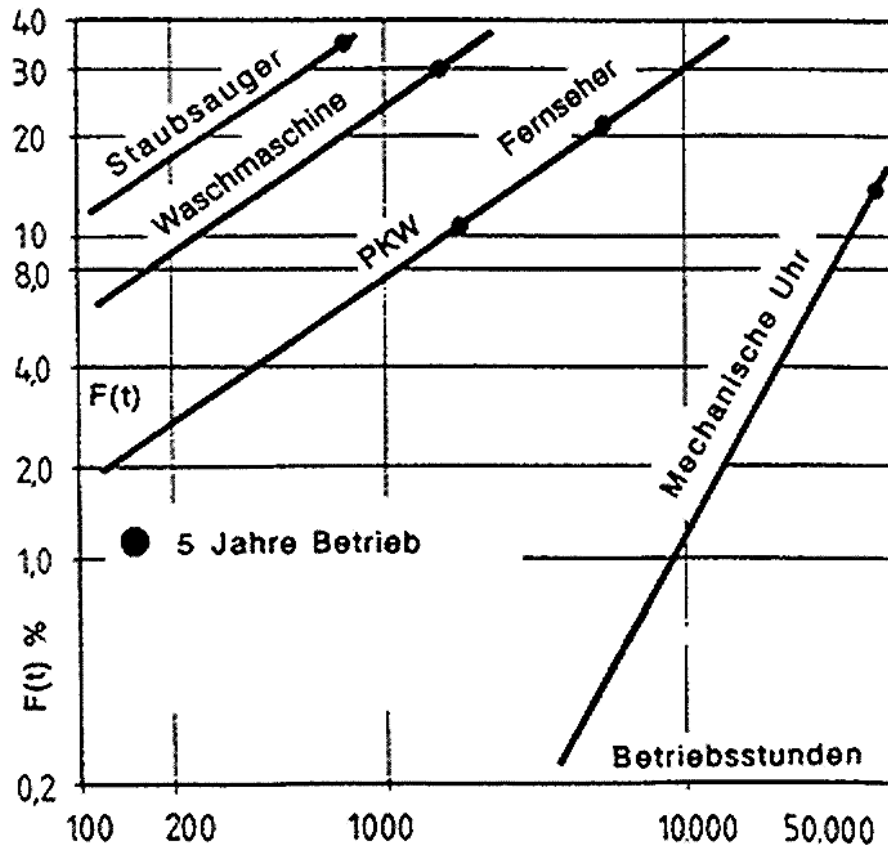
Arbeitssicherheit betrifft die Einschränkung von Gefährdungen des Menschen bei der Arbeit bzw. bei Nutzung oder Gebrauch technischer Systeme auch außerhalb der Arbeitswelt.

Umweltsicherheit befasst sich mit der Einschränkung von Schädigungen im Umfeld technischer Systeme.

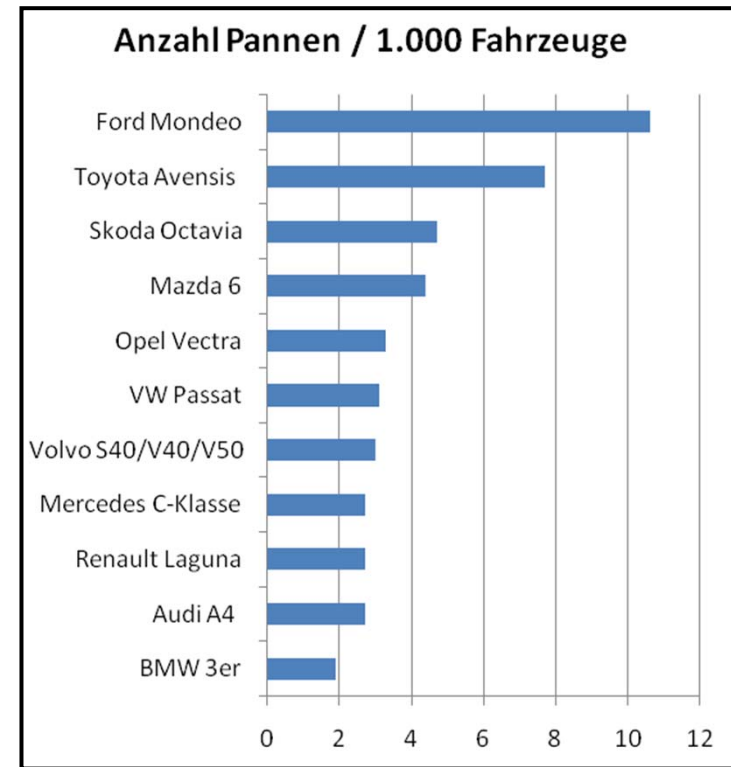


Zusammenhang zwischen Bauteil-, Funktions-, Betriebs-, Arbeits- und Umweltsicherheit

- Ohne die Voraussetzung der Bauteil- und Funktionssicherheit sind alle anderen Sicherheiten nicht gegeben. Für den Konstrukteur stehen daher alle Bereiche der Sicherheit in Zusammenhang.
- Die Bewertung von Sicherheit und Risiko ist abhängig von der technischen Anwendung. Bei häufig vorkommenden Risiken basiert die Bewertung auf Schadensstatistiken (Kraftfahrzeuge, Bergbau, WEA). Erfahrungen mit Schäden und deren Analyse führen zu Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit künftiger Schäden. Bei seltenen Ereignissen und Prototypen (z.B. Raumfahrzeuge, Reaktortechnik, Elektronik) werden Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse eingesetzt.



Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ ausgewählter Gebrauchsgüter



ADAC Pannenstatistik 2008 - Mittelklasse

- Die wirksamste Maßnahme ist eine bereits in der Konstruktionsphase durchgeführte Risikoanalyse (Erkennen, Bewerten und Begrenzen des Risikos). Entsprechende Methoden sind die **Fehlerbaumanalyse FTA** und die **Failure Mode and Effects Analysis FMEA** (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse bzw. nach DIN 25448 „Auswirkungsanalyse“). Hierbei handelt es sich um qualitative Methoden, die Schwachstellen eines Systems frühzeitig aufdecken sollen und Maßnahmen zur Ausfallverhütung aufstellen helfen.

- Ziel einer Reihe wissenschaftlicher Veröffentlichungen ist eine quantitative Sicherheit und Zuverlässigkeit in Systemen, die aus mehreren Elementen bestehen, die jeweils ein eigenes Ausfallverhalten unter Wirkung von

haben.

- Infolge der schwierigen und komplexen Methodik zur quantitativen Erfassung werden im Folgenden lediglich Vorgehensweisen und Strategien zur Konstruktion sicherer und zuverlässiger Systeme des Maschinenbaus behandelt.

3.2 Störungs- und Fehlererkennung, FTA und FMEA

- Die Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen Funktionsverhaltens des zu konstruierenden Produkts wird im Allgemeinen mit den Methoden der Qualitätssicherung beurteilt. Mit den Begriffen **Total Quality Management TQM** und **Total Quality Control TQC** nach ISO 9001 bis 9004 wird eine Qualitätsphilosophie zum Ausdruck gebracht, die davon ausgeht, dass Fehler vermeidende Maßnahmen in der gesamten Produktentstehungskette die beste Qualitätssicherung ist.

- Für den Konstrukteur bedeutet dies, dass auch während des Konstruktionsprozesses, der sich durch abwechselnde kreative und korrektive Arbeitsschritte auszeichnet, die sichere und zuverlässige Funktion ständig überprüft und die Konstruktion entsprechend angepasst werden muss. Dies beginnt mit einer Analyse der Sicherheits- und Qualitätsanforderungen des Kunden. Mit dem **Quality Function Deployment QFD** ist die Umsetzung von Kundenanforderungen in Anforderungen an die einzelnen Unternehmensbereiche möglich. Damit ist ein Einbinden dieser Forderungen in die Anforderungsliste möglich und ratsam.

- Die Informationslücke während des Konstruktionsprozesses bedingt, dass der Konstrukteur oft fehler- oder störungsbedingte Zusammenhänge nicht erkennt und später korrigieren muss. Zur Beurteilung der Sicherheit, zum Aufbau von Schutz- und Warnsystemen und zur Erhöhung der Zuverlässigkeit müssen daher entsprechend dem Stand des Konstruktionsfortschritts Fehler und Störungen bekannt sein:

- Innerhalb der Gestaltungsregeln kann grundsätzlich auf eine risikogerechtes und fehlertolerantes Gestalten der Teile geachtet werden. Wichtigste Voraussetzung hierfür ist aber die Identifizierung und Abschätzung möglicher Fehler und Störgrößen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses.

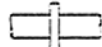







Daher:

- Im Folgenden werden die wichtigsten Methoden zur Abschätzung des Fehlerverhaltens von Systemen und zur Entwicklung von Gegenmaßnahmen genannt.

3.2.1 Qualitative Analyse, Klassifizierung

- In einer Analyse zu Sicherheit und Zuverlässigkeit des Produkts müssen zunächst mögliche Ausfallarten und ihre Verknüpfungen im Hinblick auf das Systemausfallverhalten erkannt werden. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass Bauelemente (Bauteile und Schnittstellen) mehrere Möglichkeiten des Versagens haben, z.B.

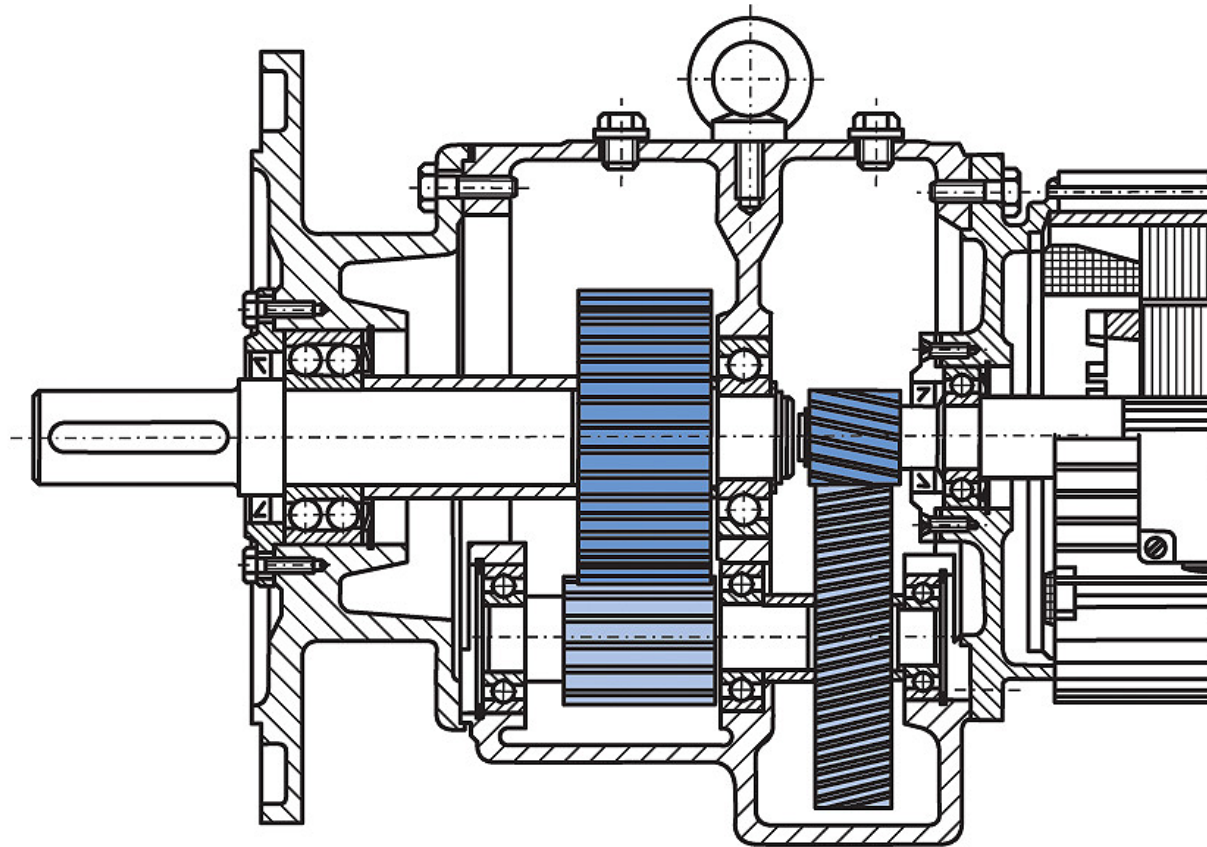
- Infolge unterschiedlicher Funktionen leisten die einzelnen Bauelemente auch unterschiedliche Beiträge zur Systemzuverlässigkeit. Daher ist als erste Maßnahme eine Klassifizierung der Systemelemente vorzunehmen, die sich an die aus den Kostenbetrachtungen bekannte ABC-Analyse anlehnt. Die Kriterien hierfür sind in der nebenstehenden Tabelle dargestellt.

Klassifizierung	A - Teile	B - Teile	C - Teile
Risiko-	-reich	-reich	-arm
Beanspruchung	durch definierbare Belastung; Lastkollektiv bekannt	vorwiegend durch Reibung, extreme Temperaturen, Verschleiß, Erschütterungen, Schmutz und Korrosion	stochastisch durch Stöße, Reibung, Verschleiß etc.
B _x -Lebensdauer	berechenbar	nicht berechenbar	nicht berechenbar
Bauteile	Welle  Lager  Zahnrad  ...	Synchronisierung  Dichtung  ...	Sicherungsring  Schraube  Deckel  ...

Kriterien der A-, B- und C-Klassifizierung bei der Risikoanalyse

- Diese Art der Klassifizierung eignet sich besonders für kleine und überschaubare Systeme. Bei umfangreichen Systemen sollte eine vollständige FMEA durchgeführt werden, bei der diese Art der Analyse systematisch abgearbeitet wird.

Beispiel: Zahnradgetriebe



Schematischer Aufbau eines Getriebemotors bis 160 kW

- Das gezeigte Getriebe wurde bezüglich der Funktion seiner Bauteile anhand einer Stückliste analysiert. Anschließend erfolgte aus Erfahrungswerten mit ähnlichen Getrieben eine Einteilung nach folgenden Gesichtspunkten:

A-Teile:

B-Teile:

C-Teile:

Sichere und zuverlässige Gestaltung konstruktiver Systeme

Nr.	Bauteil	Schnittstelle	korrelierendes Bauteil	Funktion
2.1	Ausgangswelle	UV	2.5 Paßfeder	Drehmoment übertragen/ableiten
		DI2	2.4 RWDR	(Abdichtung dynamisch)
		WN2	2.3 Rollenlager C, D	(radiale Abstützung)
		WN1	2.6 Hülse	(Zentrierung)
		WN3	2.2 Zahnrad	Drehmoment übertragen/einleiten
		AV1	2.2 Zahnrad	(axiale Abstützung)
		AV1	2.3 Rollenlager C	(axiale Abstützung)
2.2	Zahnrad	WN3	2.1 Ausgangswelle	Drehmoment übertragen/ableiten
		AV1	2.1 Ausgangswelle	(axiale Abstützung)
		AV1	2.6 Hülse	(axiale Abstützung)
		ZE	1.2 Ritzel	Drehmoment/Drehzahl wandeln
2.3	Rollenlager C	WN2	2.1 Ausgangswelle	radiale Abstützung
		WN2	3.2 Gehäuse links	radiale Abstützung
		AV1	2.1 Hülse	axiale Abstützung
		AV1	3.5 Lagerdeckel	axiale Abstützung
2.3	Rollenlager D	WN2	2.1 Ausgangswelle	radiale Abstützung
		WN2	3.2 Gehäuse rechts	radiale Abstützung
		AV1	2.6 Hülse	axiale Abstützung
		AV1	3.6 Lagerdeckel	axiale Abstützung
2.4	RWDR	DI2	2.1 Ausgangswelle	Abdichtung dynamisch
		DI1	3.6 Lagerdeckel	Abdichtung statisch
2.5	Paßfeder	UV	2.1 Ausgangswelle	Drehmoment übertragen
2.6	Hülse	WN1	2.1 Ausgangswelle	(Zentrierung)
		AV1	2.2 Zahnrad	axiale Abstützung
		AV1	2.3 Rollenlager D	axiale Abstützung

Bauteile - Systemelemente	Abkürzung	Klassifizierung
Eingangswelle - Bruch	EWS	A
Ritzel - Grübchen	ZFG	A
Ritzel - Bruch	ZRB	A
Rollenlager A	RLA	A
Rollenlager B	RLB	A
Radialwellendichtring	RD1	B
Hülse 1	HS1	C
Ausgangswelle - Bruch	AWB	A
Zahnrad - Grübchen	ZDG	A
Zahnrad - Bruch	ZDB	A
Rollenlager C	RLC	A
Rollenlager D	RLD	A
Radialwellendichtring	RD2	B
Hülse 2	HS2	C
Gehäuse - links	GHL	C
Gehäuse - rechts	GHR	C
Lagerdeckel	LD1	C
Lagerdeckel	LD2	C
Lagerdeckel	LD3	C
Lagerdeckel	LD4	C
Schrauben	SR	C
Paßstift	PS	C
Ölablaßschraube	OAS	C
Schauglas	SG	C
Entlüfter	EL	C
Dichtring	DT	C
Schrumpfsitz	SRS	A
Paßfederverbindung (Eingangswelle/Kupplung)	PF1	A
Paßfederverbindung (Eingangswelle/Ritzel)	PF2	A
Paßfederverbindung (Ausgangswelle/Kupplung)	PF3	A
statische Dichtung (Gehäuse links/rechts, Gehäuse/Lagerdeckel)	SDT	C

Funktionsanalyse (links) und ABC-Einteilung (rechts) der Getriebebauteile

3.2.2 Fehlerbaumanalyse FTA

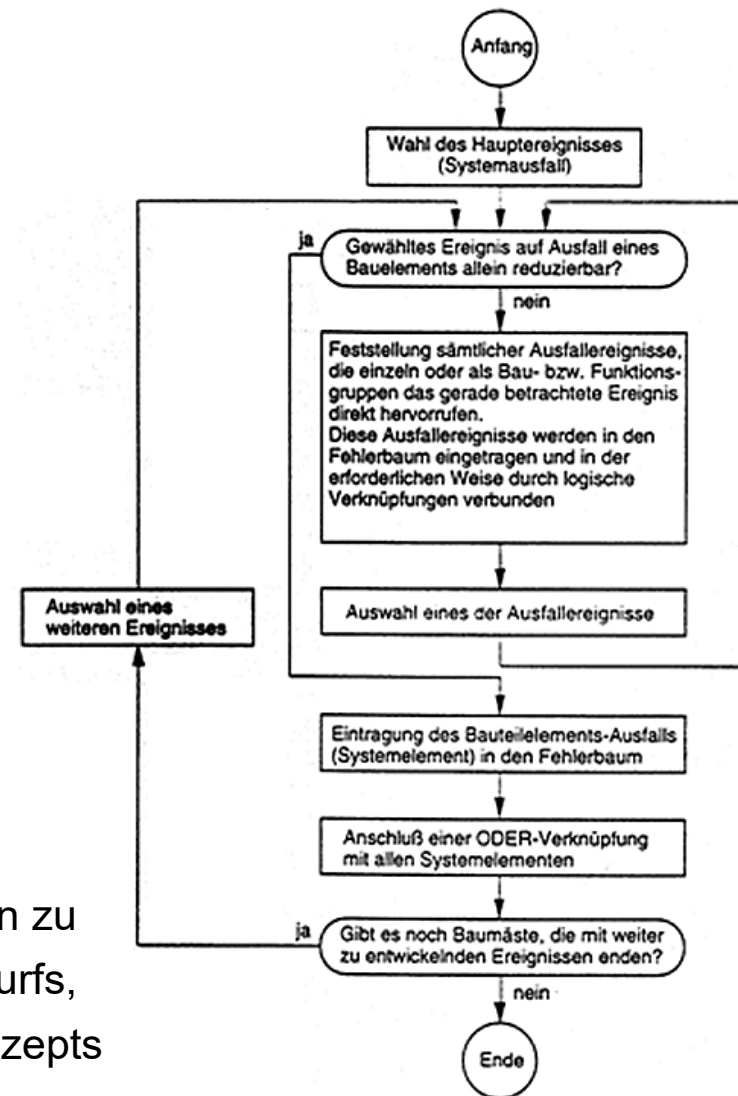
- Die Fehlerbaumanalyse dient der Erkennung eines Fehlverhaltens und der Störgrößeneinflüsse. Sie kann in den verschiedenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt werden. Mit dieser Top-Down-Vorgehensweise gewinnt man:
 - alle möglichen Ausfallarten, die den Systemausfall hervorrufen
 - eine übersichtliche und überprüfbare Dokumentation der Untersuchung
 - Beurteilungskriterien für die Schwachstellen im Systemkonzept und damit Hinweise für Änderungen
- Nachteil dieser Verfahrensweise ist die aufwendige Suche bis in den letzten Zweig des Fehlerbaums.

- Voraussetzung ist, dass
 - die Funktionsstruktur des Systems vorliegt
 - die Funktionen des Gesamtsystems und seiner Teilsysteme bekannt sind
 - die Funktionsweise der Baugruppe und der Elemente bekannt sind

- Vorgehensweise:**

Nach folgendem Schema werden die erkannten Funktionen nacheinander negiert und der Grund für den Ausfall gesucht. Dies führt zu einer systematischen Abarbeitung von der Struktur bis hin zu den Einzelteilen mit Beurteilung nach dem UND/ODER-Prinzip und zur Erarbeitung von Abhilfemaßnahmen.

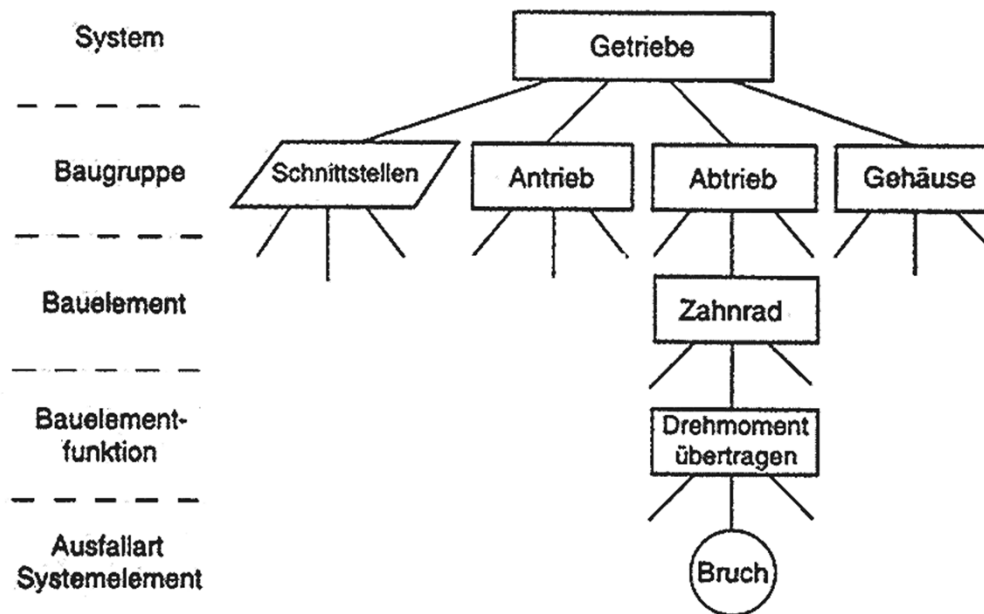
- Die daraus zu ziehenden Konsequenzen führen zu einer entsprechenden Verbesserung des Entwurfs, im Zweifelsfalle auch die Überprüfung des Konzepts oder zu Vorschriften über Montage, Handhabung, Transport, Instandhaltung etc.



Vorgehensweise bei der FTA

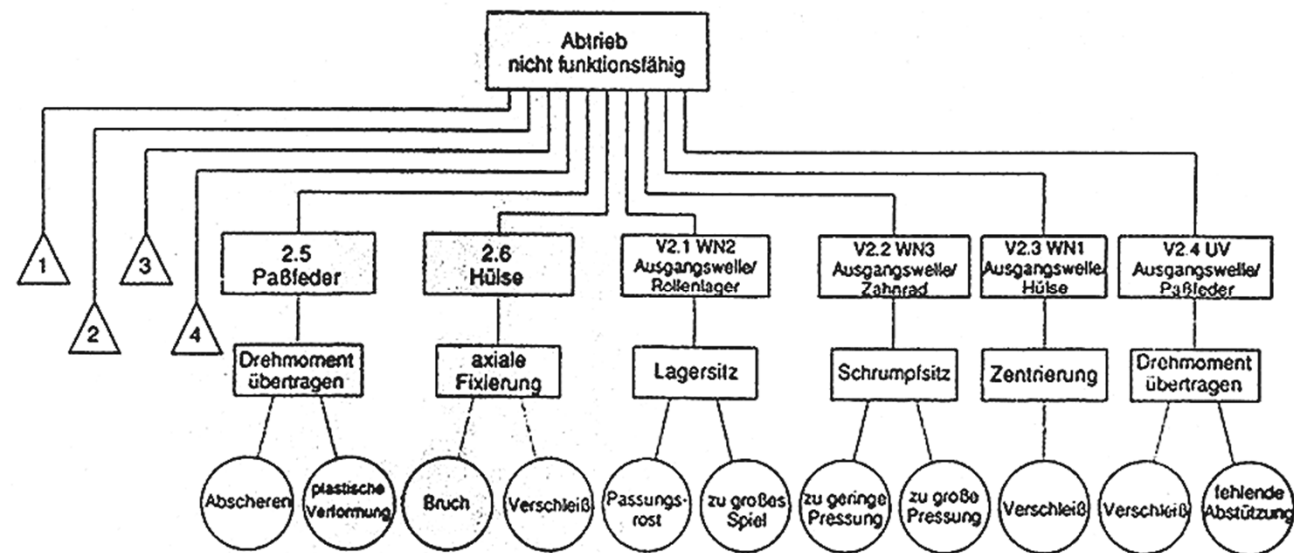
Beispiel: Zahnradgetriebe

- Außer in der direkten hierarchischen Struktur, kann das Getriebe auch durch Ausfall der Schnittstellen zu den beteiligten Baugruppen funktionsunfähig werden, z.B. „Lagerung der Ausgangswelle versagt“

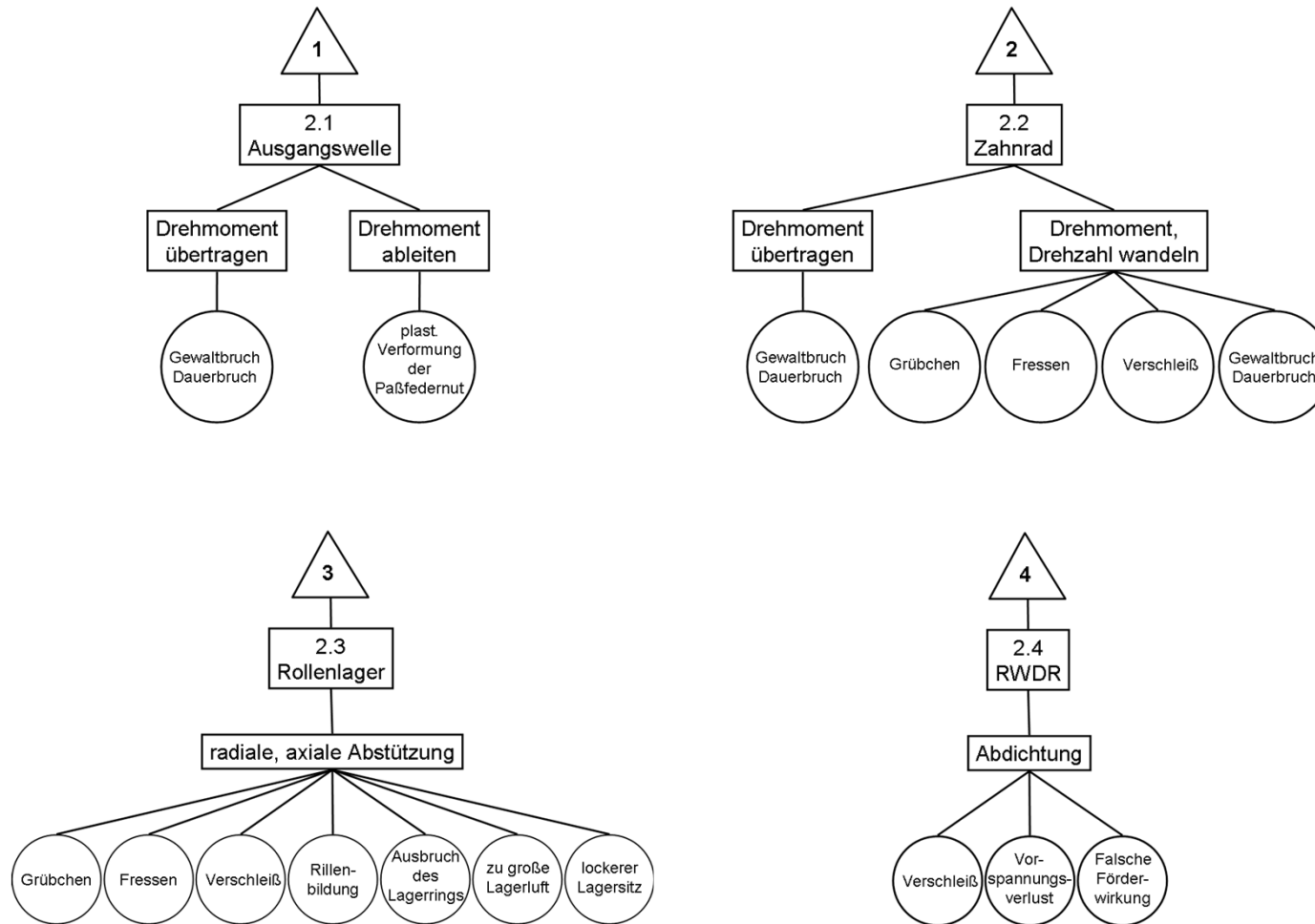


Fehlerbaumstruktur
des Beispielgetriebes

- Der Fehlerbaum für die Gruppe Antrieb ist in der folgenden Darstellung zu erkennen. Für das Ereignis „Antrieb nicht funktionsfähig“ können die Ereignisse „Zahnrad nicht funktionsfähig“ oder „Schrumpfsitz nicht funktionsfähig“ verantwortlich sein. Das heißt, die Schnittstellen der Einzelemente sind ebenfalls zu berücksichtigen.



Fehlerbaumanalyse der Gruppe Antrieb des Beispielgetriebes



Fehlerbaumanalyse der Gruppe Abtrieb des Beispielgetriebes

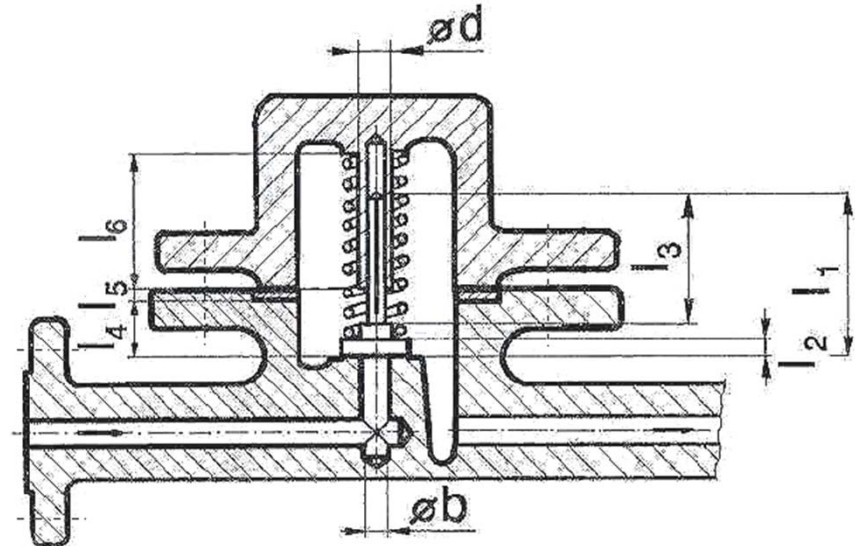
- Die FTA kann grundsätzlich in unterschiedlichen Stadien des Konstruktionsprozesses vorgenommen werden, wobei die Vollständigkeit vom jeweiligen Wissenstand abhängt. Empfehlenswert ist der Einschub einer kritischen Phase.

Beispiel: Überdruckventil (1)

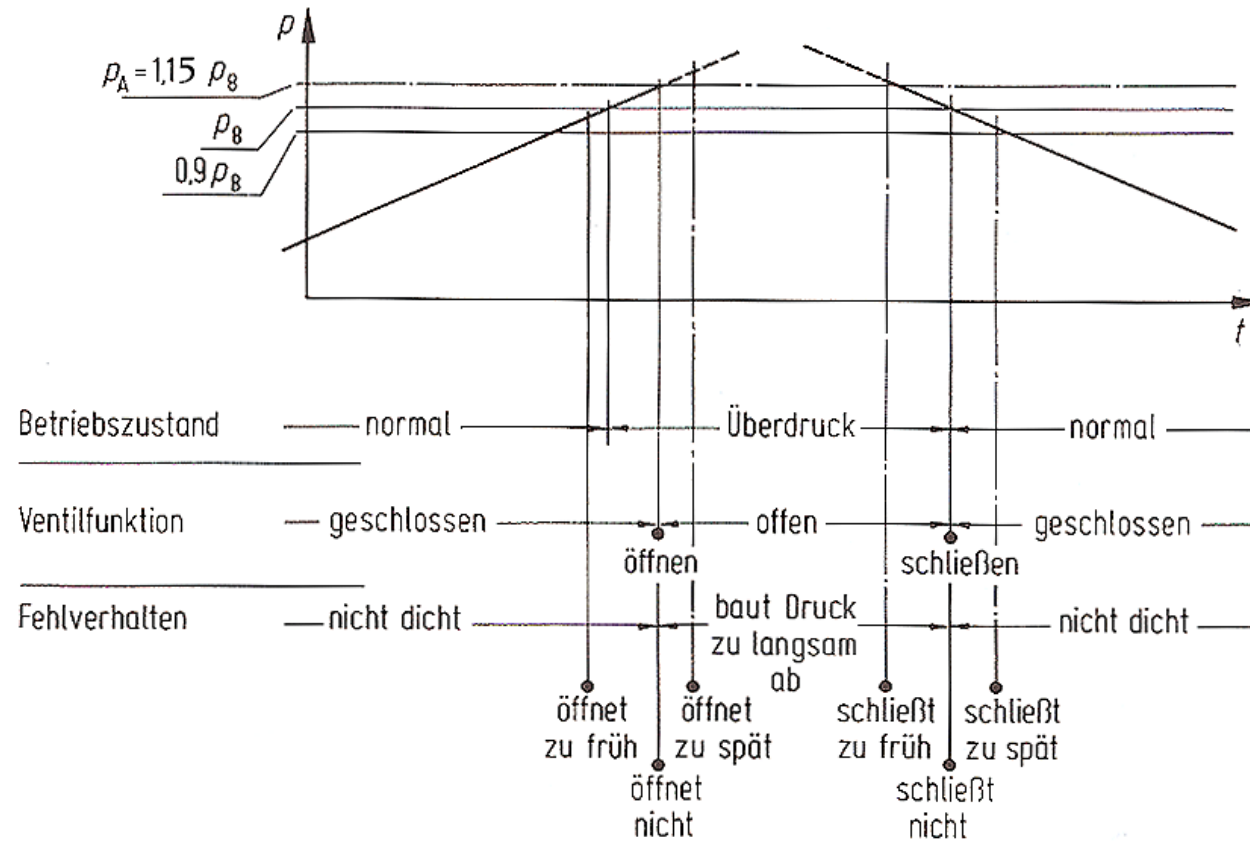
- Ausgehend von der Anforderungsliste und dem grundsätzlichen Konzept eines Überdruckventils lassen sich die geforderten Funktionen ableiten.

Bei Überschreiten des 1,15-fachen Betriebsdrucks F_0 soll das Ventil öffnen, bei Unterschreiten des Betriebsdrucks schließen. F_0

Die Hauptfunktionen sind damit:

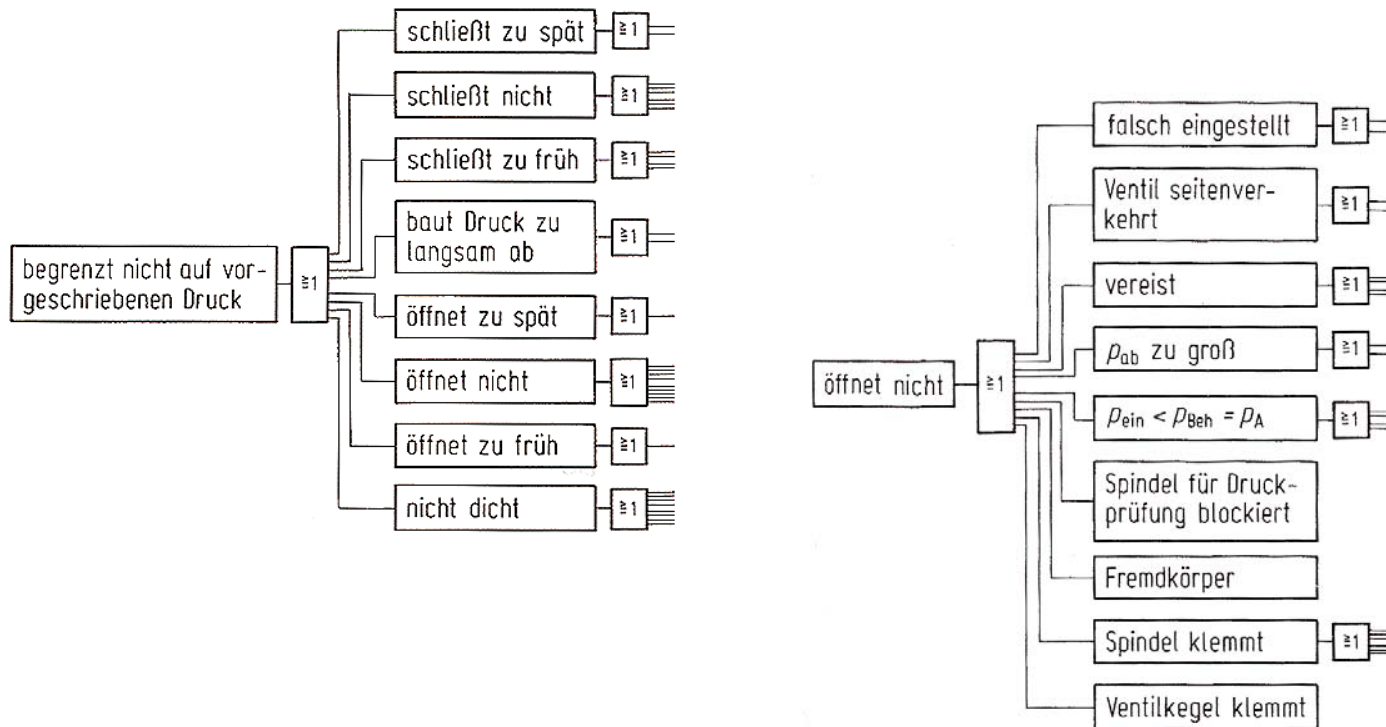


Beispiel: Überdruckventil (2)



Betriebszustand, Ventil-Hauptfunktionen und Fehlerverhalten des Überdruckventils

Beispiel: Überdruckventil (3)

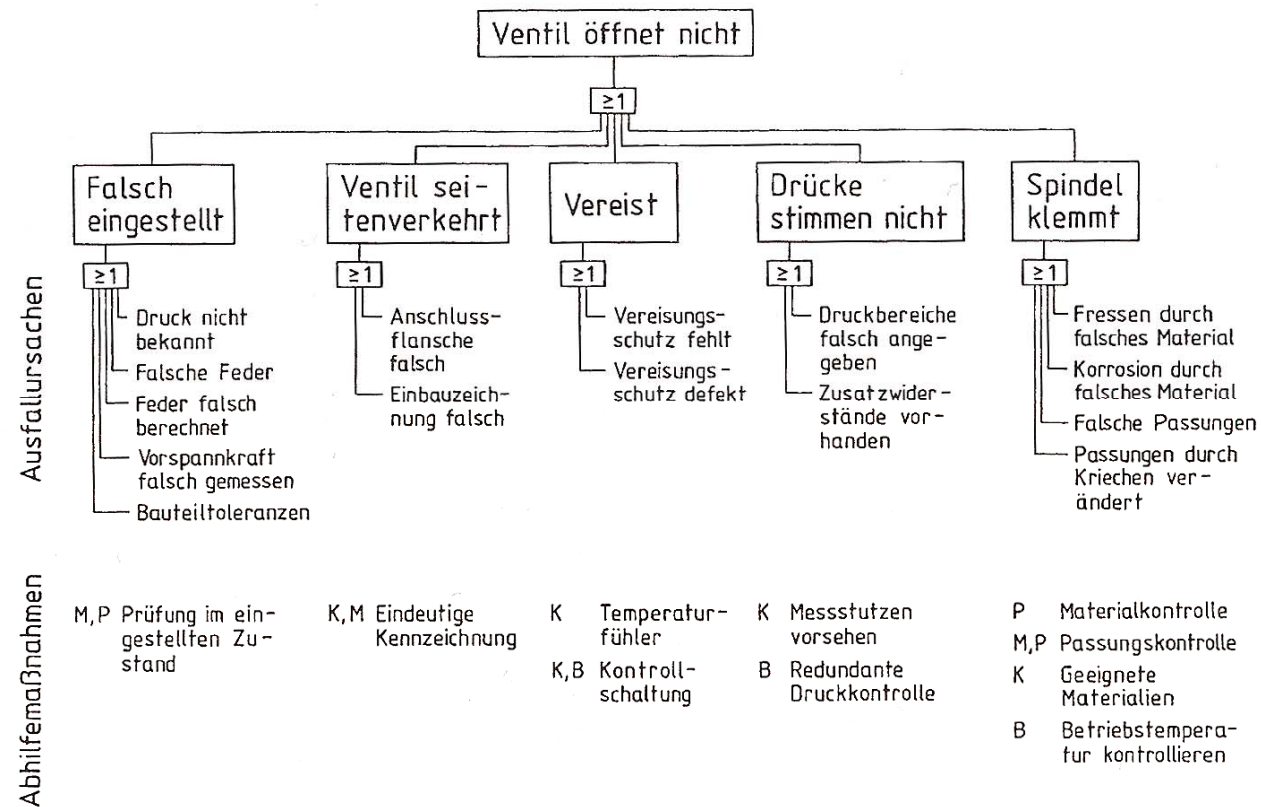


Aufbau des Fehlerbaums ausgehend von dem oben erkannten Fehlverhalten

Beispiel: Überdruckventil (4)

- Im Folgenden wird die Fehlfunktion „Ventil begrenzt nicht auf vorgeschriebenen Druck“ verfolgt. Dies führt zu weiteren Teilfunktionen, deren Fehlfunktionen ebenfalls weiterverfolgt werden können
- Im vorliegenden Fall der Untersuchung während der Konzeptphase werden nur die Funktionen und Ihre Nichterfüllung betrachtet. Die Analyse beinhaltet noch nicht die einzelnen Baugruppen sowie Systemelemente und deren Versagensmöglichkeiten. Das Ergebnis dieser Analyse mündet in eine Erweiterung der Anforderungsliste, bevor mit der eigentlichen Entwurfsarbeit begonnen wird.

Beispiel: Überdruckventil (5)



Abhilfeursachen und Abhilfemaßnahmen für Fehlverhalten

Beispiel: Überdruckventil (6)

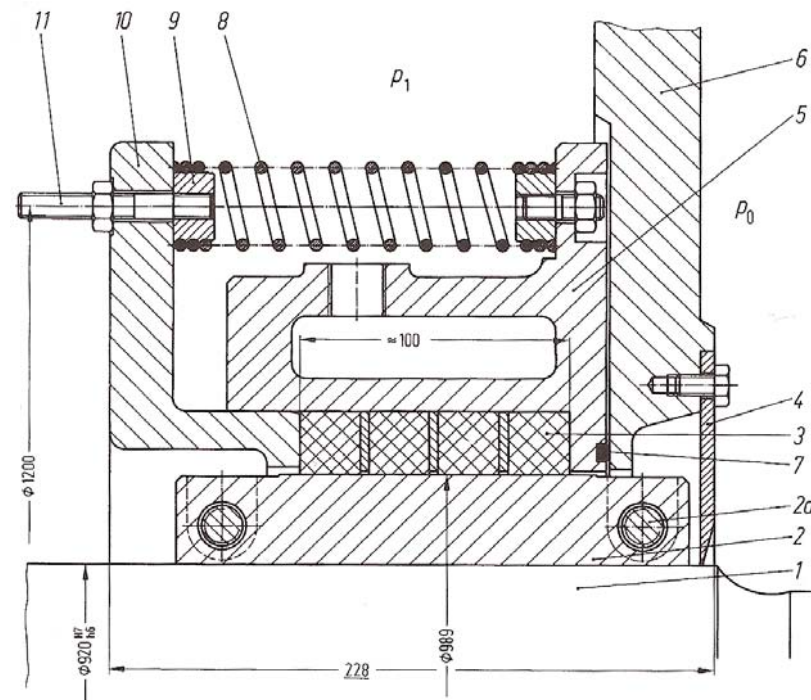
			<i>Anforderungsliste</i>			
			für Sicherheits - Abblaseventil		Blatt: 1	Seite: 3
<i>Änder.</i>	<i>F W</i>	<i>Pos.</i>	<i>Anforderungen ^{x)}</i>			<i>Verantw.</i>
1.9.93		22	Ventilteller mit ebener Dichtfläche (kein Ventilkegel)			
"		23	Keine starre Verbindung Ventilteller - Spindel			
"		24	Einfache Möglichkeit Dichtflächen auszubessern oder auszutauschen			
"		25	Hubbegrenzung in definierter Lage			
"		26	Dämpfung der Ventilbewegung			
"	W	27	Aufstellung in verschlossenem, frostgeschütztem Raum (siehe auch DIN 3396 5.22)			
"		28	Keine schleifenden Dichtungen, Reibung vermeiden			
"		29	Eindeutige Einbaustellung erzwingen (z. B. unterschiedliche Flanschgrößen für Ein- und Austritt)			
			x) Forderungen wurden nach Erstellung des Fehlerbaumes und der Gegenmaßnahmen ergänzt.			
			<i>Ersetzt</i> <i>Ausgabe vom</i>			

Ergänzung der Anforderungsliste nach Durchführen der FTA in der Konzeptphase

Beispiel: Wellendichtung eines Großgenerators (1)

- Die Stopfbuchsendichtung läuft gegen eine sogenannte Wärmeschutzhülse. Die Baugruppe ist auf denkbare Fehlverhalten hin zu untersuchen.

Die Hauptfunktion ist damit:



Wellendichtung eines Großgenerators
zum Sperren der Kühlluft

Beispiel: Wellendichtung eines Großgenerators (2)

- Wie in der Tabelle dargestellt, werden zu Beginn der Untersuchungen die Teilfunktionen analysiert. Für die Sperrfunktion sind dabei folgende Teilfunktionen wesentlich:

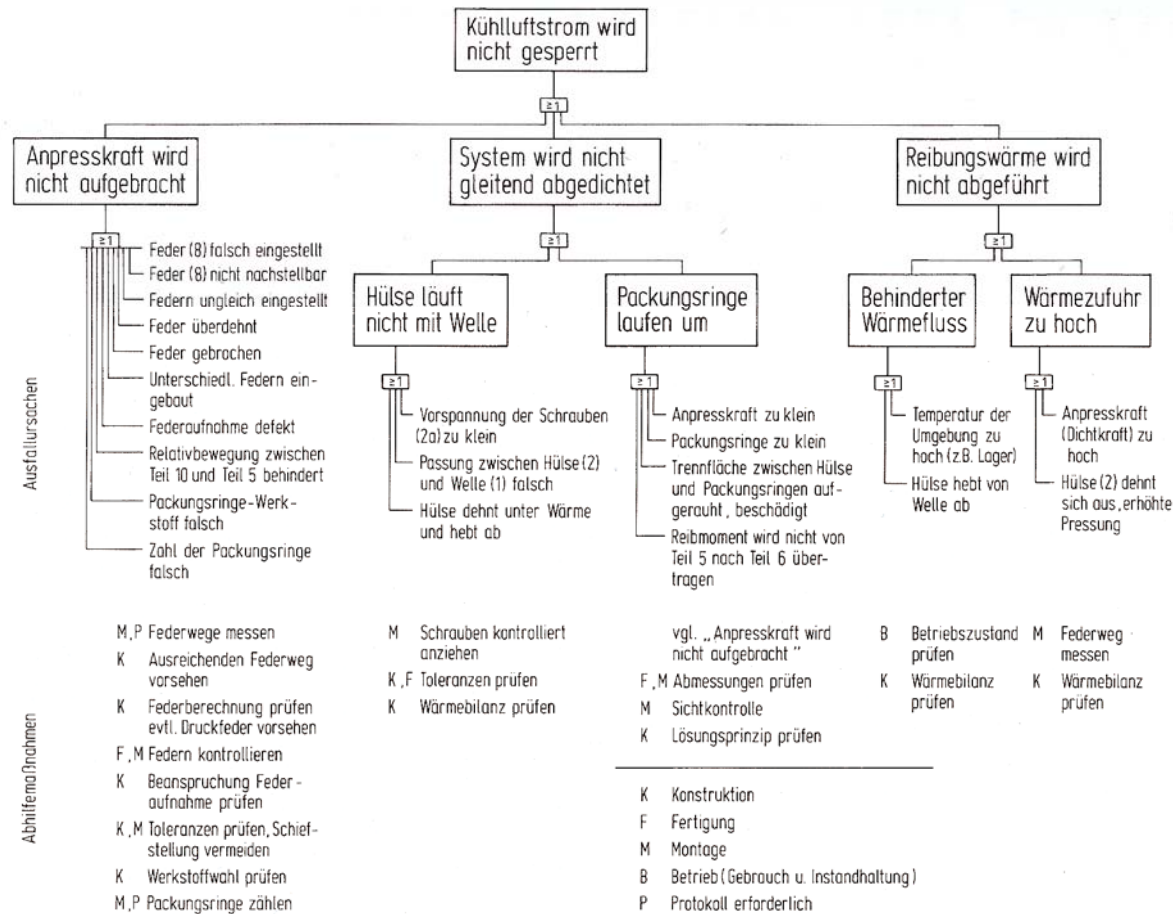
Nr.	Teil	Funktion
1	Welle	Drehmoment übertragen, Hülse aufnehmen, Reibungswärme ableiten
2, 2a	Hülse (2teilig, verschraubt)	Lauf- und Dichtfläche bieten, Welle schützen, Reibungswärme leiten
3	Packungsringe	Medium gleitend abdichten, Anpresskraft aufnehmen und Dichtdruck ausüben
4	Abstreifring	Spritzöl abhalten
5	Stopfbüchsengehäuse	Packungsringe aufnehmen, Anpresskraft aufnehmen und übertragen
6	Gestell	Teile 4 und 5 aufnehmen
7	Runddichtung	Zwischen p_1 und p_0 abdichten
8	Zugfeder	Anpresskraft erzeugen
9	Federaufnahme	Federkraft leiten
10	Spannring	Anpresskraft übertragen, Zugfedern aufnehmen
11	Schraube	Federn einstellbar vorspannen

Analyse der Teile zum Erkennen der von ihnen übernommenen Funktionen

Beispiel: Wellendichtung eines Großgenerators (3)

- Nach Negieren der Teilfunktionen wird die FTA durchgeführt.
- Mittels FTA kommt man zu der Erkenntnis, dass die Wärmeschutzhülse kritisch ist, da nur über sie die Wärme aus der Reibung abfließen kann. Zur Abstellung dieses Problems ist eine konstruktive Änderung notwendig.

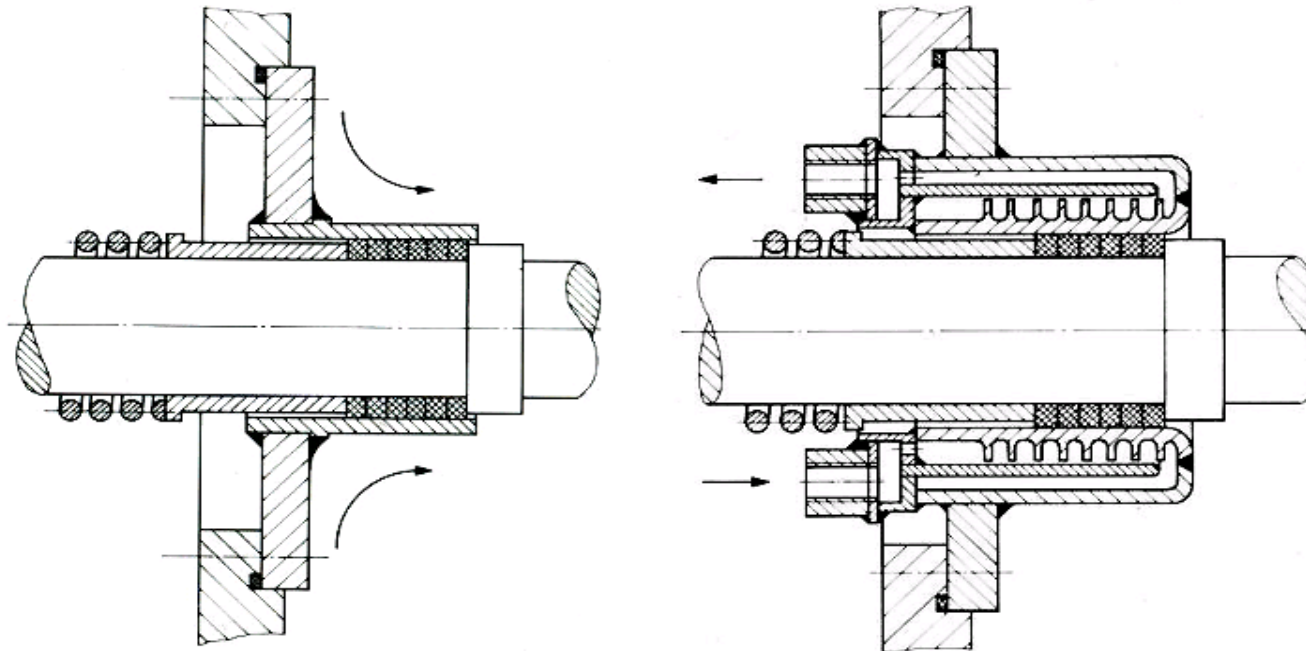
Beispiel: Wellendichtung eines Großgenerators (4)



FTA der Wellendichtung

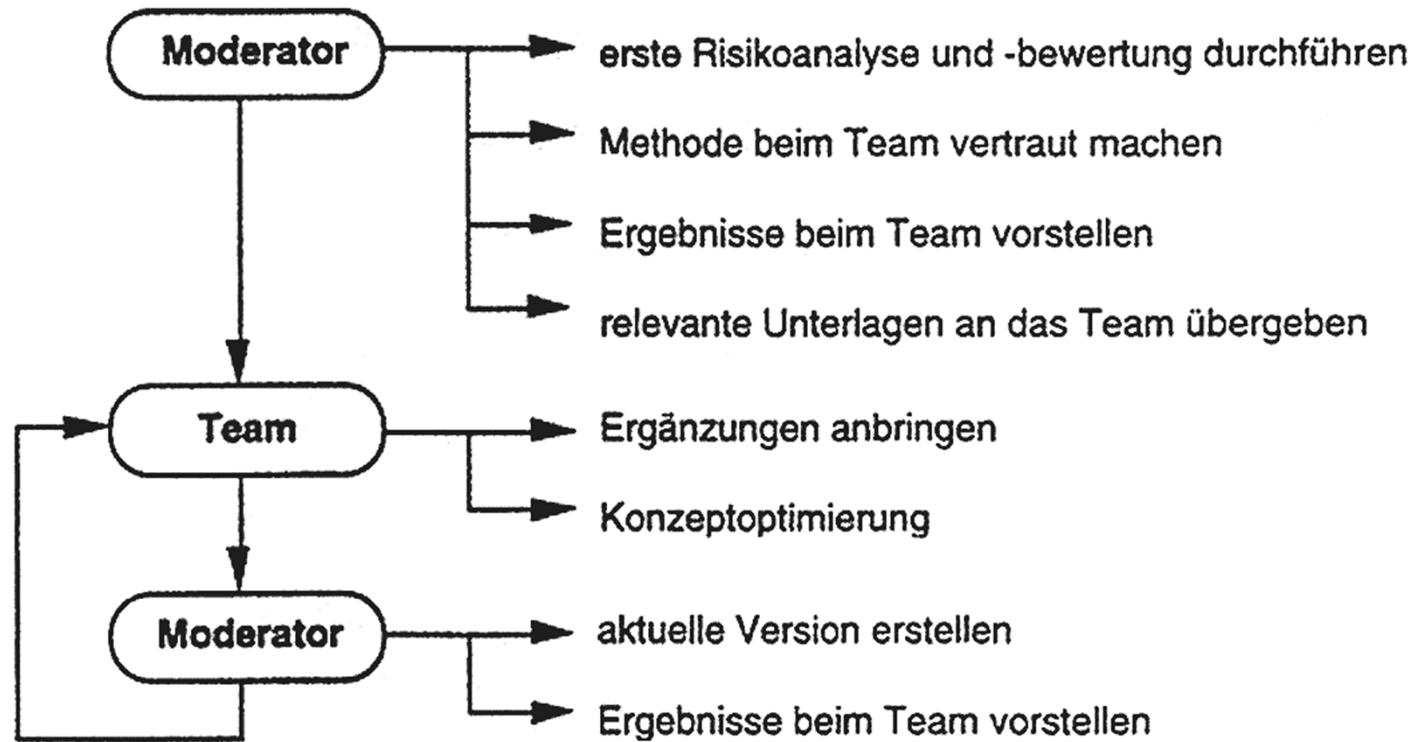
Beispiel: Wellendichtung eines Großgenerators (5)

- Lösung: Verlegung der Reibung nach außen

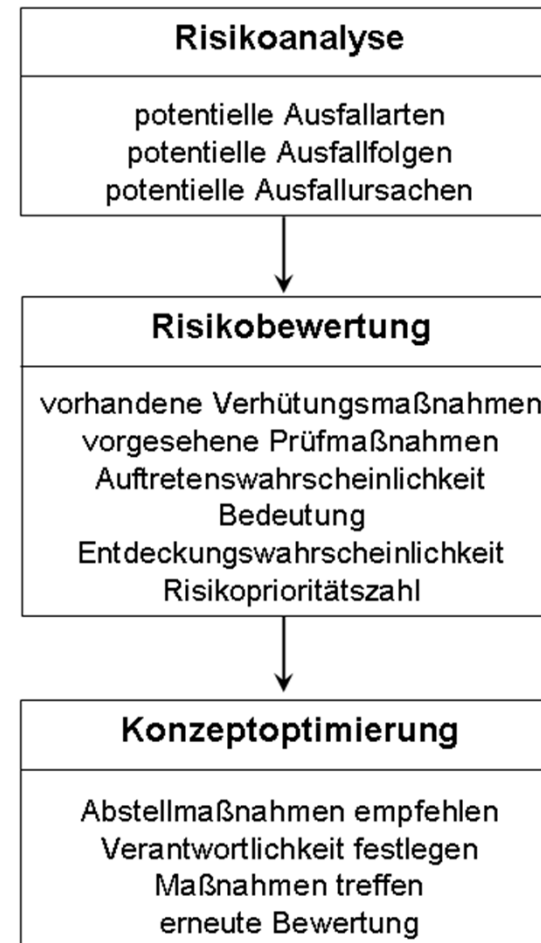


3.2.3 Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse FMEA

- Bei der FMEA handelt es sich um eine weitgehend formalisierte Methode zur systematischen Erfassung möglicher Fehler und zur Abschätzung der damit verbundenen Risiken. Im Gegensatz zur FTA weist die FMEA einen qualitativen Charakter auf und hat ihren Ursprung in der Qualitätsbewertung. Mit der Durchführung befassen sich Arbeitsgruppen aus den Bereichen Entwicklung/Konstruktion, Fertigungsplanung, Qualitätswesen, Einkauf, Vertrieb und Kundendienst. Dabei übernimmt die Moderation ein Mitarbeiter aus der Qualitätssicherung. Die FMEA dient außer der Störungssuche auch als Übergabeprotokoll für die Fertigung und dient der Steuerung des gesamten Qualitätssicherungsprozesses. Je nach Anwendung wird zwischen Produkt-FMEA, Konstruktions-FMEA und Prozess-FMEA unterschieden.

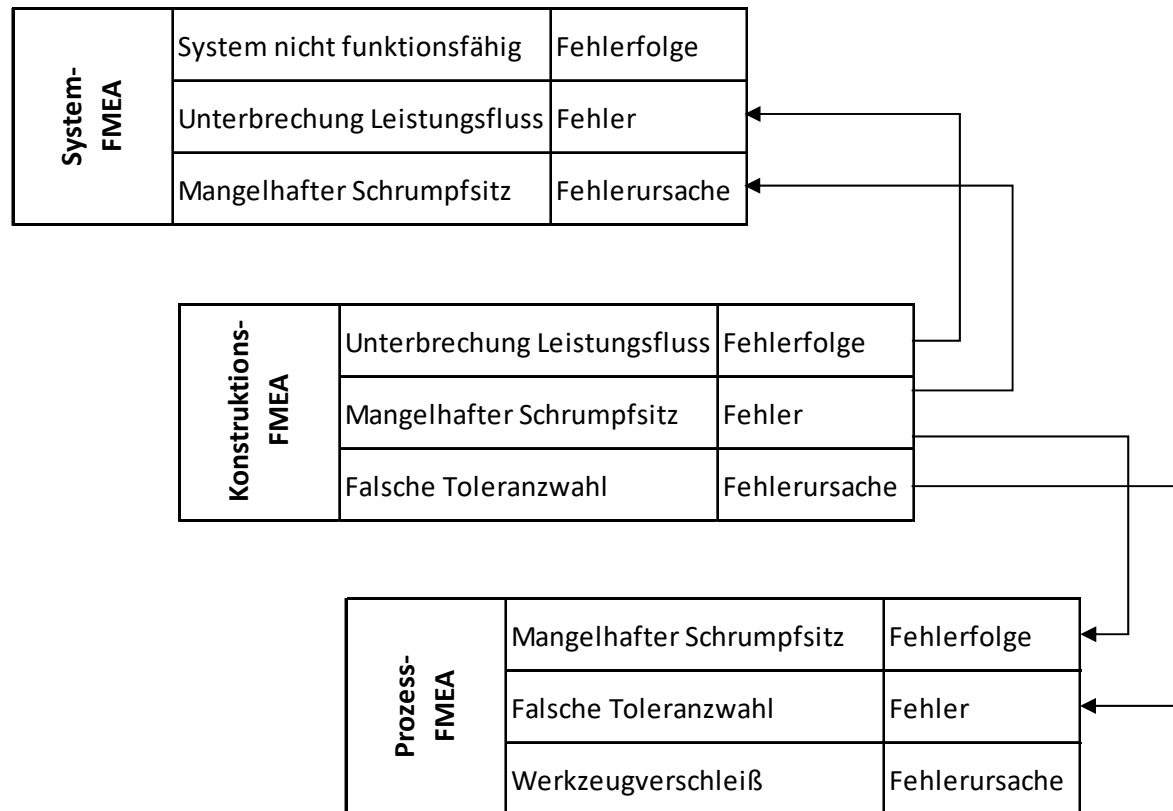


- Nach der Analyse der potentiellen Ausfallarten und -ursachen schließt sich eine Risikobewertung, welche die Bedeutung der Ausfallfolgen, die Ausfall- und Entdeckungswahrscheinlichkeit umfasst. Die Bewertung erfolgt mit Bewertungszahlen, die eine Prioritätenfolge der Maßnahmen erlauben.



Ablauf der FMEA

- Die Prozess-FMEA baut logisch auf der Konstruktions-FMEA und diese wieder auf der System-FMEA auf. Es ergibt sich eine Ursachen-Folge-Kette.



Zusammenhang zwischen den FMEA-Arten

Sichere und zuverlässige Gestaltung konstruktiver Systeme

Fehler-Ort/Merkmal	Fehler-Art	Fehler-Auswirkung	Fehler-Ursache	Derzeitiger Zustand				Empfohlene Maßnahmen	Verbesserter Zustand					
				Kontroll-Maßnahmen	A	B	E		RPZ	Getroffene Maßnahmen	A	B	E	RPZ
Welle	Bruch der Welle	Totalausfall	Belastungsart nicht korrekt erkannt		3	10	10	300	Auftretende Belastung durch geeigneten Berechnungsansatz erfassen	Festigkeitsnachweis der Welle	1	10	10	100
	Lagerung	Spiel in der Lageranordnung	unexakte Funktionserfüllung	Lockern der Wellenmutter im Betrieb (Stoßbeanspruchung)		3	8	10	240	Zusätzliche Sicherung der Wellenmutter		1	8	10
Welle-Nabe-Verbindung (Flanschschraubverbindung)	Dichtung durchlässig	frühzeitiger Lagerverschleiß	Dichtung genügt nicht den Anforderungen		2	5	10	100	Radialwellendichtring nach DIN verwenden		1	5	10	50
	Reibschluß nicht ausreichend	Querbeanspruchung der Schrauben	Auslegungsfehler (Nichtberücksichtigung der Reibwerte)		2	6	10	120	Ausreichenden Sicherheitsbeiwert berücksichtigen		1	6	10	60
	Passungsgenauigkeit	Fügen nicht möglich bzw. Zentrierung nicht ausreichend	Konstruktionsfehler		2	5	1	10	Toleranzrechnung überprüfen		1	5	1	5
Kurvenzylinder	Bruch der Schrauben	Totalausfall	Belastungsart nicht korrekt erkannt		3	10	10	300	Geeigneten Berechnungsansatz für den vorliegenden Belastungsfall verwenden	dynamische Schraubenauslegung	1	10	10	100
	Flächenpressung zu groß	Pittings (Grübchen) in der Lauffläche	zu hohe Flächenpressung durch den Hebel		7	8	10	560	Geeignete Werkstoffpaarung Angepaßte Geometrie		2	8	10	160

A: Auftreten

B: Bedeutung

E: Entdeckung

RPZ: Risiko-Prioritätszahl

Wahrscheinlichkeit des Auftretens
(Fehler kann vorkommen)

Auswirkungen auf den Kunden

Wahrscheinlichkeit der Entdeckung
(vor Auslieferung an Kunden)

unwahrscheinlich = 1
sehr gering = 2 - 3
gering = 4 - 6
mäßig = 7 - 8
hoch = 9 - 10

kaum wahrnehmbare Auswirkungen = 1
unbedeutender Fehler (geringe Belästigung des Kunden) = 2 - 3
mäßig schwerer Fehler = 4 - 6
schwerer Fehler (Verärgerung des Kunden) = 7 - 8
äußerst schwerwiegender Fehler = 9 - 10

hoch = 1
mäßig = 2 - 5
gering = 6 - 8
sehrgering = 9
unwahrscheinlich = 10

hoch = 1000
mittel = 125
keine = 1

FMEA-Formblatt

- Als Hilfe der möglichen Ausfälle, Ursachen und Folgen können Checklisten dienen. Ferner können die zur Überprüfung einer Konstruktion aufgestellten Leitlinien verwendet werden.
- Die Nutzung von Checklisten empfiehlt sich auch bei der FTA.

Potentielle Fehlerart	
Grübchen Pittings	Kurzschluss
Gewaltbruch	Unterbrechung
Dauerbruch	Blockieren
Fressen	Vibration, Schwingung
Verschleiß	Verunreinigung
Korrosion	Undicht
Passungsrost	Geplatzt
Verformung	Umstülpung
Riffelbildung	Klemmt, schwergängig
Ausbruch	Eingefallen
Verlust	Farbunterschied
Abscheren	Fluchtungsfehler
Gelockert, lose, wackelt	Schmutz-, Wassereintritt
Herausgefallen	Verschmutzung
Falsche Pressung	Lunker
Zu großes Spiel	Aufweiten
Lösen der Verbindung	Klappert

Checklisten für die FMEA

Potentielle Fehlerauswirkung	
Geräusch	Geruch
Schwingungen	Erwärmung
Unterbrechung des Leistungsflusses	Zerstörung der Bauteile
Beeinträchtigung des Laufverhaltens	Rutschen
Leckage	Schalthemmung
Funktionsausfall	Wandern der Bauteile
Schlechtes Aussehen	Ausschlag
Stillstand	Kratzen
Unruhiger Lauf	Erschwerte Montage und Demontage

Potentielle Fehlerursachen	
Falsche Materialwahl	Kerbwirkung
Auslegungsfehler	Mißverständnis
Unvorhergesehene, unzulässige Belastung	Fehlende Kontrolle
Materialfehler	Zu geringe Ölviskosität
Falsche Oberflächenhärte	Zu große Oberflächenrauheit
Ungünstige Betriebstemperatur	Zu große Form- und Lageabweichung
Schmiermittelmangel	Unzureichende Steifigkeit
Falsche Toleranzwahl	Falsche Montage
Beschädigung der Dichtfläche	

Checklisten für die FMEA

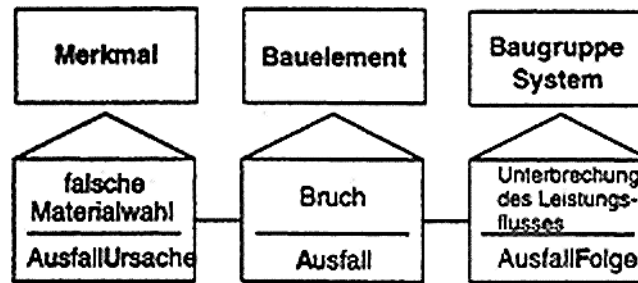
- Dem Aufbau des FMEA-Formblatts kann man gleichzeitig den Ablauf entnehmen:
 1. Risikoanalyse mit der Betrachtung von Bauteilen/Prozessschritten in Bezug auf:
 - Potentielle Fehler
 - Fehlerfolgen
 - Fehlerursachen
 - geplante Maßnahmen zur Fehlerentdeckung und Fehlervermeidung

2. Risikobewertung

- Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten des Fehlerauftretens
- Abschätzung der vom Kunden wahrgenommenen Auswirkung beim Auftreten des Fehlers
- Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler vor Auslieferung entdeckt wird (hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit bedeutet kleineres Risiko und damit kleinere Punktzahl)

3. Bestimmung der Risikoprioritätszahl: ab $RPZ > 125$ ist der Zustand kritisch

4. Maßnahmen zur Verbesserung der Konstruktion / des Prozesses



- Einstieg "Ausfall"
 - + Basis sind Stück- und Funktionsliste, d. h. alle Bauelemente werden erfaßt
 - u. U. Funktion nicht vollständig berücksichtigt
- Einstieg "Ausfallfolge"
 - + Funktion vollständig berücksichtigt
 - u. U. übersehen von Ausfällen und Ausfallursachen
- Einstieg "Ausfallursache"
 - + allgemeinsten Ansatz
 - Funktion kann nicht vollständig berücksichtigt werden

Vor- und Nachteile der verschiedenen Vorgehensweisen bei der FMEA

Sichere und zuverlässige Gestaltung konstruktiver Systeme

Hauptmerkmal	Beispiele
Funktion	Wird die vorgesehene Funktion erfüllt ? Welche Nebenfunktionen sind erforderlich ?
Wirkprinzip	Bringen die gewählten Wirkprinzipien den gewünschten Effekt, Wirkungsgrad und Nutzen ? Welche Störungen sind aus dem Prinzip zu erwarten ?
Auslegung	Garantieren die gewählten Formen und Abmessungen mit dem vorgesehenen Werkstoff bei der festgelegten Gebrauchszeit und unter der auftretenden Belastung ausreichende Haltbarkeit, zulässige Formänderung, genügende Stabilität, genügende Resonanzfreiheit, störungsfreie Ausdehnung, annehmbares Korrosions- und Verschleißverhalten ?
Sicherheit	Sind die Betriebs-, Arbeits- und Umweltsicherheit beeinflussenden Faktoren berücksichtigt ?
Ergonomie	Sind die Mensch-Maschine-Beziehungen beachtet ? Sind Belastungen, Beanspruchungen und Ermüdung berücksichtigt ? Wurde auf gute Formgebung (Design) geachtet ?
Fertigung	Sind Fertigungsgesichtspunkte in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht berücksichtigt ?
Kontrolle	Sind die notwendigen Kontrollen während und nach der Fertigung oder zu einem sonst erforderlichen Zeitpunkt möglich und als solche veranlasst ?
Montage	Können alle inner- und außerbetrieblichen Montagevorgänge einfach und eindeutig vorgenommen werden ?
Transport	Sind inner- und außerbetriebliche Transportbedingungen und -risiken überprüft und berücksichtigt ?
Gebrauch	Sind alle beim Gebrauch oder Betrieb auftretenden Erscheinungen, wie z.B. Geräusch, Erschütterung, Handhabung in ausreichendem Maße beachtet ?
Instandhaltung	Sind die für eine Wartung, Inspektion und Instandsetzung erforderlichen Maßnahmen in sicherer Weise durchführ- und kontrollierbar ?
Recycling	Ist Wiederverwendung oder -verwertung ermöglicht worden ?
Kosten	Sind vorgegebene Kostengrenzen einzuhalten ? Entstehen zusätzliche Betriebs- oder Nebenkosten ?
Termin	Sind die Termine einhaltbar ? Gibt es Gestaltungsmöglichkeiten, die die Terminsituation verbessern können ?

Leitlinie mit Hauptmerkmalen beim Gestalten

3.3 Prinzipien der sicherheitsgerechten Konstruktion

- Nur der störungsfreie, unfallfreie und zuverlässige Betrieb einer richtig konzipierten Anlage stellt den wirtschaftlichen Erfolg auf Dauer sicher. Da Sicherheit zur Vermeidung von Unfällen und Schäden unmittelbar mit der Zuverlässigkeit der Einzelteile und konstruktiven Systemen einhergeht, ist es zweckmäßig Sicherheit durch mittel- und unmittelbare Sicherheitstechnik als integrierten Bestandteil in ein System konstruktiv zu installieren.

- Was will der Konstrukteur mit sicherheitstechnischen Prinzipien erreichen?
 1. Vermeidung direkter Bauteilschäden
 2. Vermeidung von Folgeschäden
 3. Schutzsysteme mit Warnung, Meldung und/oder Selbstüberwachung

- Der Konstrukteur bedient sich dabei einer Sicherheitstechnik, die nach DIN 31000 als eine Dreistufenmethode aufgefasst werden kann
 - unmittelbare Sicherheitstechnik
 - mittelbare Sicherheitstechnik
 - hinweisende Sicherheitstechnik

- Grundsätzlich wird die unmittelbare Sicherheitstechnik angestrebt. Das heißt, die Lösung ist so zu wählen, dass vom Aufbau der Konstruktion selbst keine Gefährdung ausgeht.
Geht dennoch von der Konstruktion eine Gefährdung aus, muss die mittelbare Sicherheit, das heißt die Integration bzw. Anwendungen von Schutzsystemen, ins Auge gefasst werden.
Die hinweisende Sicherheitstechnik, die nur noch vor Gefahren warnen kann und die Auffindung der Gefährdungsbereiche bzw. Schadensquellen erleichtern kann, ist nur zusätzlich anzuwenden und ersetzt weder die Maßnahmen der mittelbaren noch der unmittelbaren Sicherheitstechniken
- Da die sicherheitsrelevanten Fragestellungen sowohl den Bereich der Konzeption, der Dimensionierung als auch die Detaillierung betreffen, sind die folgenden Prinzipien auch in allen Phasen des Konstruktionsprozesses anwendbar.

3.3.1 Prinzipien der unmittelbaren Sicherheitstechnik

- Die unmittelbare Sicherheitstechnik versucht, die Sicherheit mittels der an der Funktionserfüllung aktiv beteiligten Systeme oder Bauteile zu gewinnen. Hierbei unterscheidet man zwischen:
 - Prinzip des sicheren Bestehens
 - Prinzip des beschränkten Versagens
 - Prinzip der redundanten Sicherheitstechnik

Prinzipien des sicheren Bestehens (safe life)

- Alle Bauteile und deren Berücksichtigung in der Baugruppe müssen so beschaffen sein, dass während des vorgesehenen Einsatzzeitraums kein Versagen eintritt bzw. der Betrieb störungsfrei funktioniert.

Dies wird sichergestellt durch die Abstimmung von:

- Je nach Aufgabenstellung wird dabei folgende Vorgehensweise abgearbeitet:

- Erfassen der auf das System einwirkenden Belastungen und Umweltbedingungen wie erwartende Kräfte, ihre Zeitdauer, thermische, chemische und elektromagnetische Umgebungsbedingungen
- ausreichend sichere Auslegung, basierend auf bewährten Hypothesen und genormten Berechnungsverfahren
- Bauteil- und Systemuntersuchungen zur Ermittlung der Haltbarkeit (Bauteilfestigkeit)
- zahlreiche und gründliche Kontrollen des Fertigungs- und Montagevorgangs
- Erprobungen

- Kennzeichnend ist, dass die Sicherheit nur in der genauen Kenntnis aller Einflüsse, der Verlässlichkeit der Berechnungen und der Verlässlichkeit der Qualität beruht.
- Zum Teil ist eine Safe-life-Konstruktion nur mit erheblichen Aufwand zur Ermittlung des Bauteilfestigkeitsverhaltens verbunden

und erfordert ständig laufende Kontrollen im Werkstoff- und Fertigungsbereich.

- Versagen führt meist zu Bauteilschäden → Folgeschäden

- Das Prinzip des sicheren Bestehens entspricht dem klassischen Verfahren von Dimensionierung und Tragfähigkeitsnachweis im Maschinenbau. Die dabei vorhandenen Unsicherheiten durch:

führen zur Definition eines Sicherheitsfaktors, der für den Konstrukteur wichtig ist.

- Für diese Sicherheit übernimmt der Konstrukteur die Verantwortung. Im Stahl- und Kranbau sind durch die weitgehende Normierung der Berechnungsverfahren und Lastannahmen die Sicherheiten durch Angaben der zulässigen Beanspruchungen genormt, im Maschinenbau gibt es nur Hinweise, die den Konstrukteur unterstützen, z.B.:
 - für unsichere Berechnung und schwere Folgen
 - für genaue Lastannahmen, abgesicherte Berechnungsverfahren und mechanische Voraussetzungen (mechanisches Einsatzbild stimmt, Randbedingungen stimmen!) und bekanntem Werkstoffverhalten.

- Grundsätzlich können folgende Werte angenommen werden

Stationäre oder statische Beanspruchung (1)

Sicherheit gegen Bruch

bei Betriebstemperaturen < Kristallerholungstemperatur

bei Betriebstemperaturen > Kristallerholungstemperatur

Empfohlene Sicherheitsbeiwerte für zähe Werkstoffe bei ruhender Last und glatten Stäben

Werk	Sicherheitsbeiwert
Dubbel	1,2 ... 1,5
Tauscher	1,3 ... 2,0

Empfohlene Sicherheitsbeiwerte für spröde metallische Werkstoffe bei ruhender Last und glatten Stäben

Werk	Sicherheitsbeiwert
Tauscher	2,5 ... 3,5
Hütte	3,0 ... 4,0

Empfohlene Sicherheitsbeiwerte für zähe Werkstoffe bei dynamischer Last und glatten Stäben

Werk	Sicherheitsbeiwert
Dubbel	1,5 ... 2,5
Tauscher	2,0 ... 3,0
Hütte	2,0 ... 3,0

Stationäre oder statische Beanspruchung (2)

Sicherheit gegen Fließen

Werkstoff	Z %	S _F
S235	45 ... 65	1,33 ... 1,2
16MnCr5	> 50	1,3
C45	30 ... 40	1,4 ... 1,37

Z ... Brucheinschnürung in %

Die Werte gelten bei niedrigen Betriebstemperaturen, oberhalb der Kristallisationstemperatur ist $S_F = 1$ zu wählen.

Sicherheit gegen Knicken

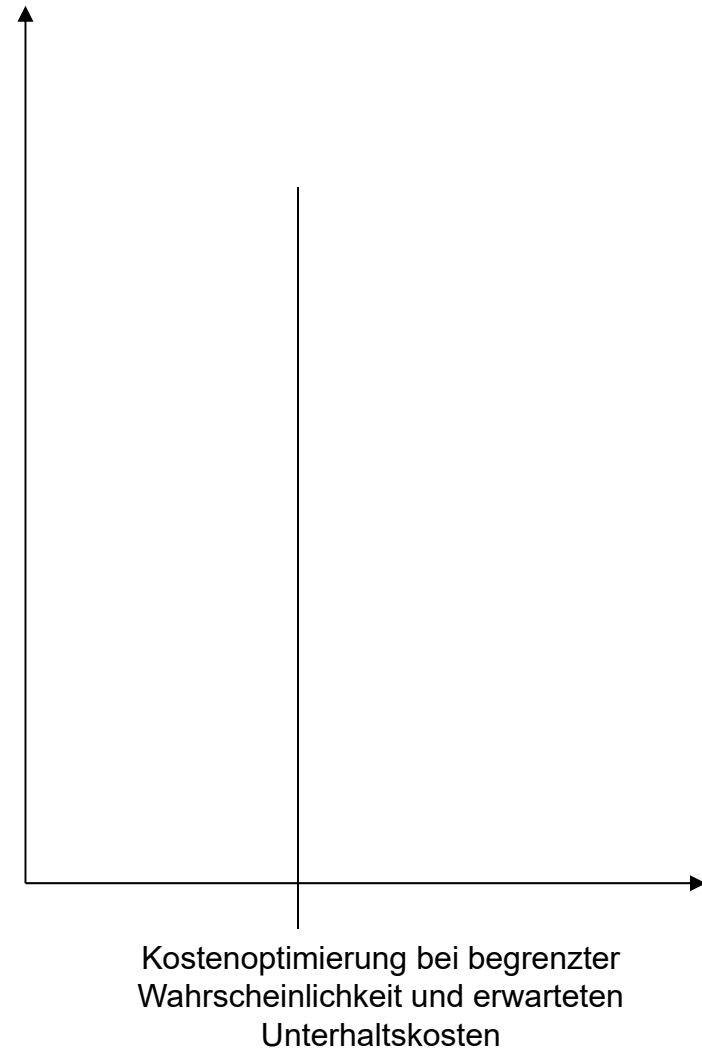
Dynamische Beanspruchung (1)

Sicherheit gegen Bruch, Fließen und Knicken sind die gleichen Sicherheitswerte wie bei statischer Beanspruchung zu wählen.

Sicherheit gegen Dauerbruch

Bei dynamischer Beanspruchung ist die Ausfallwahrscheinlichkeit zu berücksichtigen.

- Bei der safe-life-Auslegung besteht neben dem technischen Risiko auch ein wirtschaftliches.
- Beide Risikoarten sind abhängig von der Konstruktion.

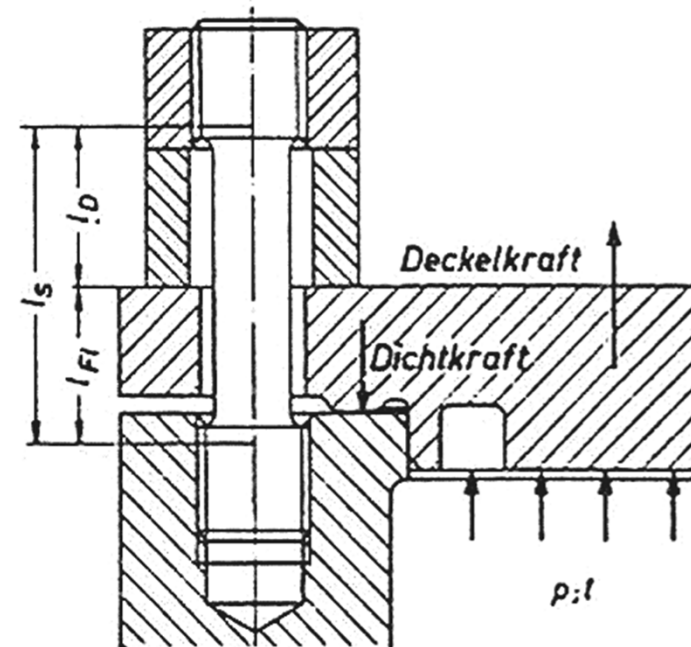


Prinzipien des beschränkten Versagens (fail safe)

- Während einer definierten Einsatzzeit werden Funktionsstörungen oder sogar Bruch zugelassen, ohne dass es zu schwerwiegenden Folgen kommen kann. In Bezug auf die Anforderungen heißt das:
 - es muss eine – wenn auch eingeschränkte – Funktion erhalten bleiben, die einen gefährlichen Zustand vermeidet
 - Fehler und Versagen müssen detektierbar sein
 - Ort und Verlauf des Versagens müssen eine Beurteilung des für die Gesamtsicherheit maßgebenden Zustands ermöglichen
- Die Veränderung der Betriebsbedingungen durch Einsetzen der Schädigung wird durch folgende Indikatoren:

Beispiel: Dehnschraube

- Bei fachgerechter Auslegung erfolgt bei Überlast eine Verringerung der Klemmkraft.



Beispiel: Flugzeugrumpf (1)

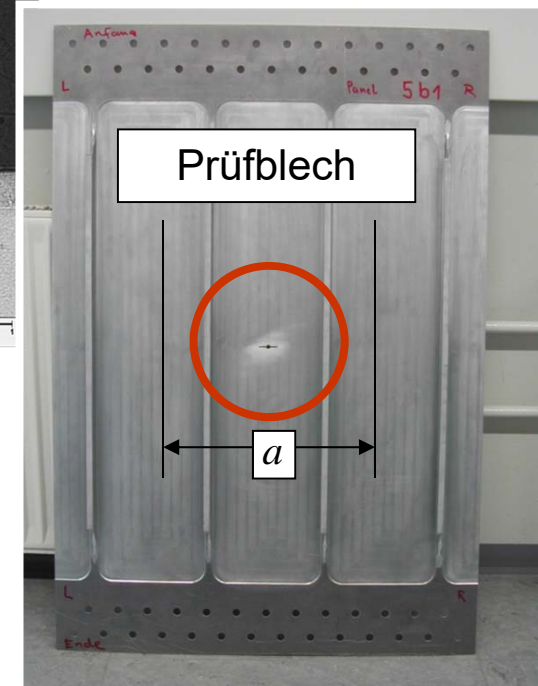
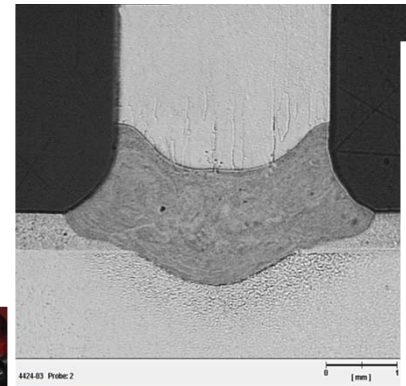
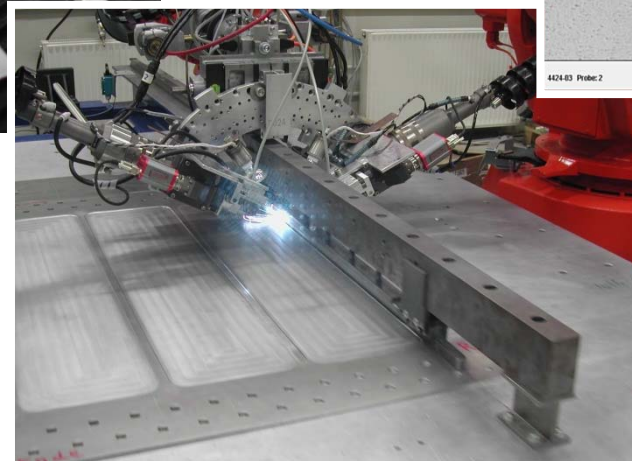
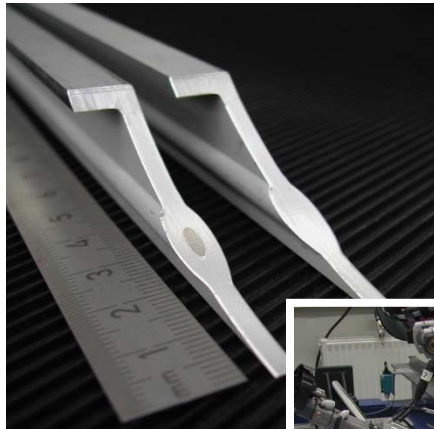
- 1988 riss ein Stück des oberen Rumpfes einer Boeing 737-200 der Fluggesellschaft ALOHA Airways heraus. Ursache war Materialermüdung infolge Korrosion.



Ein Jet wie ein Cabrio – obwohl das Dach der Boeing auf fast zehn Meter abgerissen war, landete der Pilot die Maschine auf Hawaii sicher

Beispiel: Flugzeugrumpf (2)

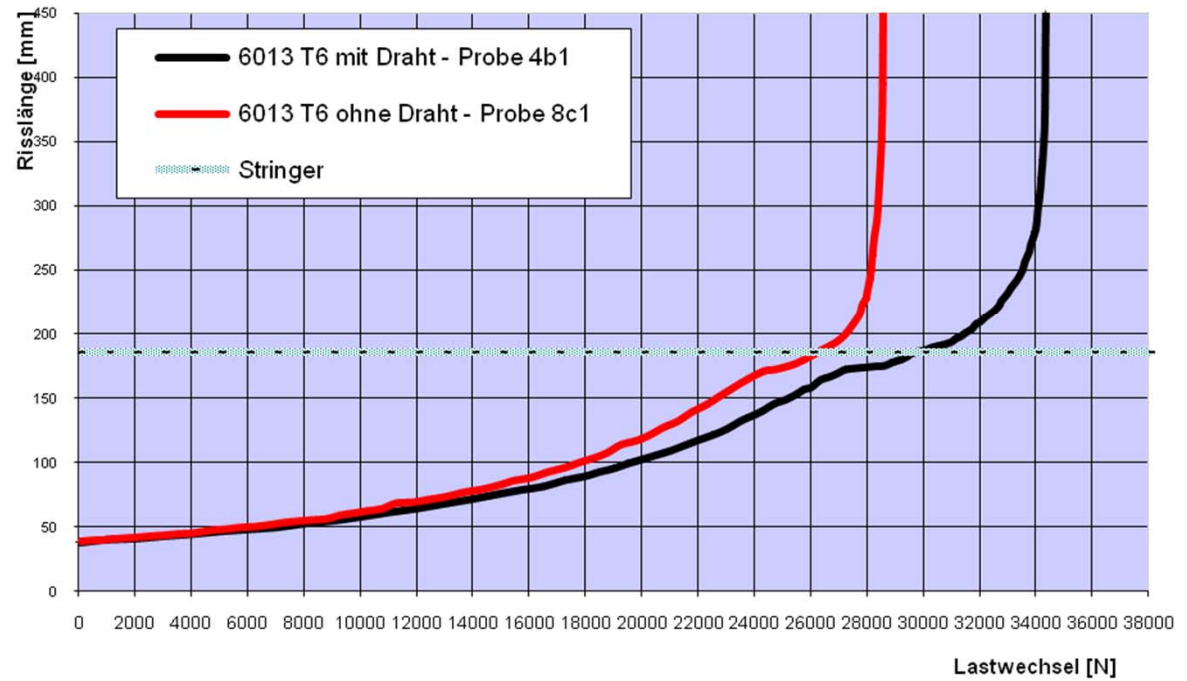
- Bei Rissfortschrittsuntersuchungen wird in Abhängigkeit von Konstruktion, Werkstoffauswahl und Kraftereinleitung das Strukturverhalten unter Berücksichtigung einer Schädigung des Hautfeldes in Form eines Risses untersucht.



Beispiel: Flugzeugrumpf (3)



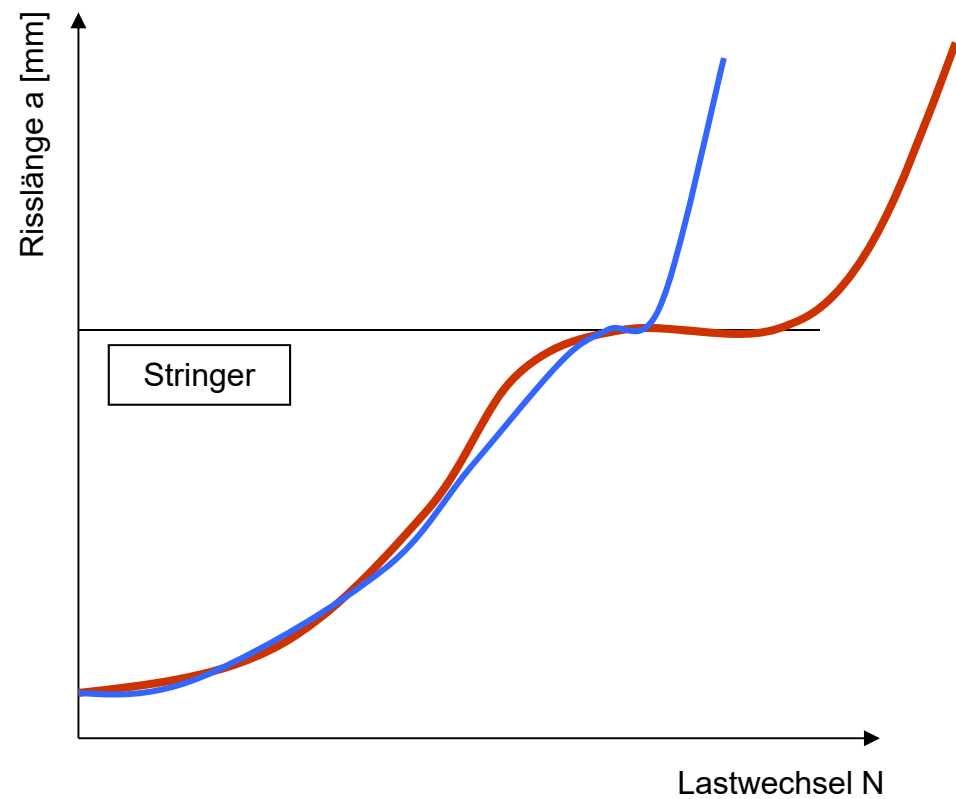
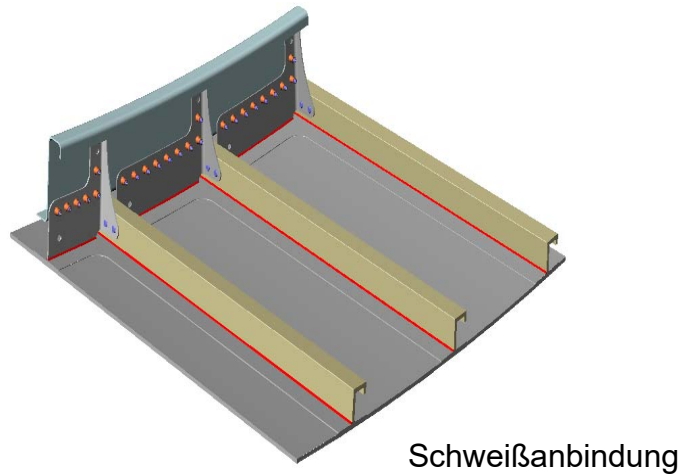
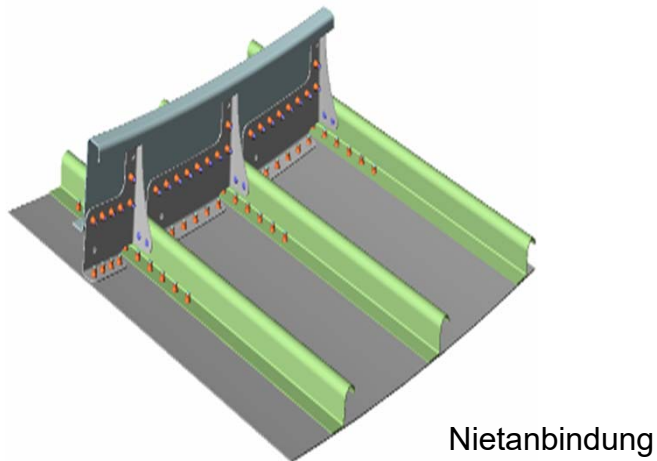
RIFO-Kurven 4-Stringer Hautfelder



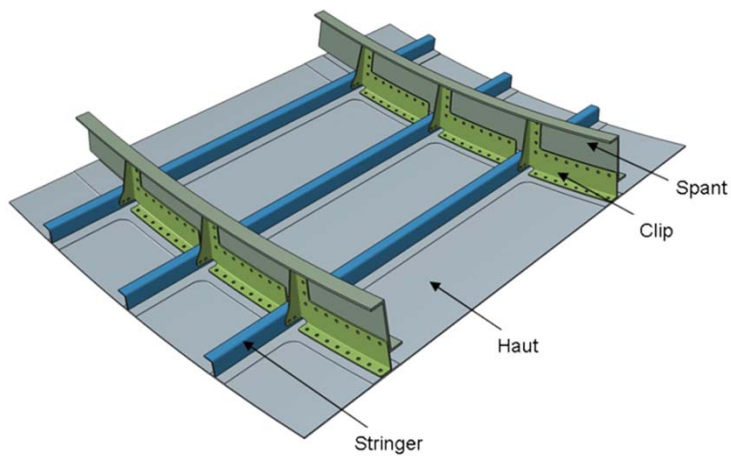
oben: Rissfortschrittsdiagramm: Risslänge über Lastwechsel

rechts: Servohydraulische Prüfanlage der Firma Instron

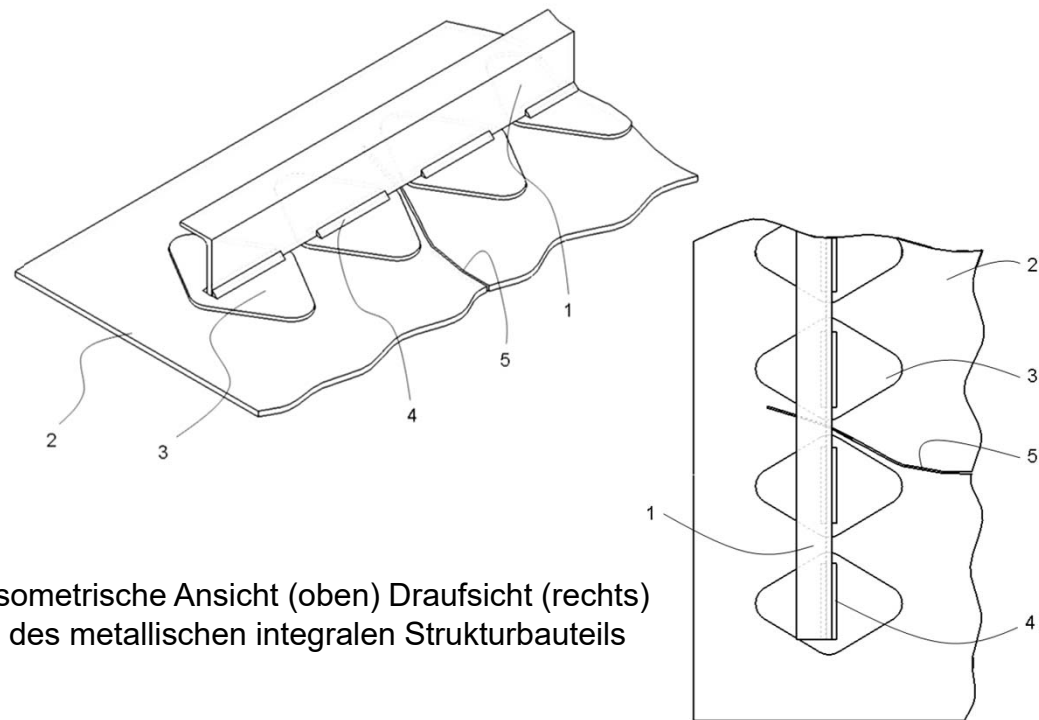
Beispiel: Flugzeugrumpf (4) – Vergleich des RiFo-Verhaltens von Differential- und Integralstruktur



Beispiel: Flugzeugrumpf (4)



Ausführung der gegenwärtigen geschweißten (integralen) Hautblechstruktur

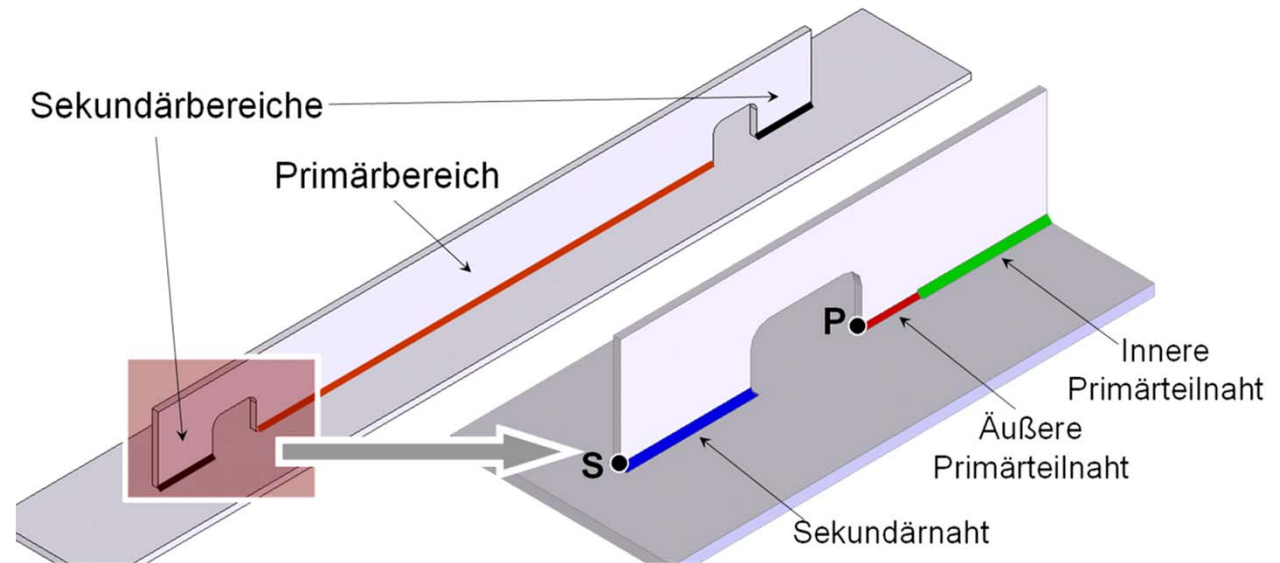


Isometrische Ansicht (oben) Draufsicht (rechts) des metallischen integralen Strukturbauteils

Beispiel: Flugzeugrumpf (5) – Metallisches, integrales Strukturbauteil

- Die Neuerung besteht darin, dass unterhalb der Versteifungselemente (1) das Hautblech (2) Aufdickungen (3) vorsieht, die durch Bereiche mit geringerer Blechdicke voneinander separiert sind. Die schweißtechnische Anbindung der Versteifungselemente an das Hautblech erfolgt ausschließlich über die Aufdickungen. Demzufolge ist der Stringer partiell über Steppnähte (4) mit dem Hautblech verbunden.
- Trifft ein im Hautblech fortschreitender Riss (5) auf die Aufdickung, so ist der Riss gezwungen, einen durch den Dickensprung vorgegebenen Pfad bzw. Richtung einzunehmen. Folglich wird der Riss aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt und läuft un-terhalb des Versteifungselements zwischen den Aufdickungen im Hautblech hindurch. Das Versteifungselement bleibt über einen längere Zeit intakt, da die Risspitze sich für eine bestimmte Anzahl von Lastwechseln nicht in die Versteifungselemente ausbreitet. Folglich nehmen die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ab sowie die Restfestigkeit zu. Das Versteifungselement wirkt demnach als Rissverzögerer. Es liegt ein differentielles Versagensverhalten vor.

Beispiel: Flugzeugrumpf (6)



Optimierung Bauteilverhalten

im Flugbetrieb

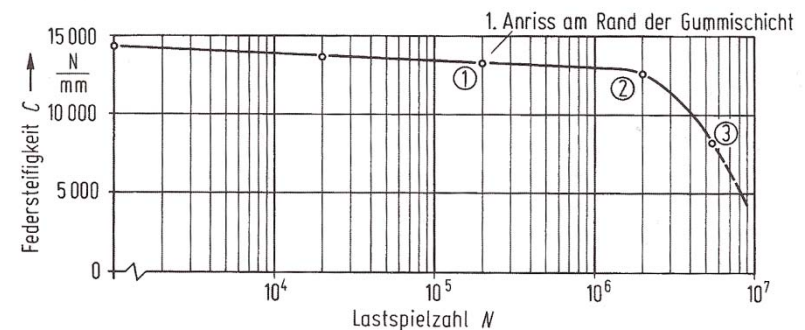
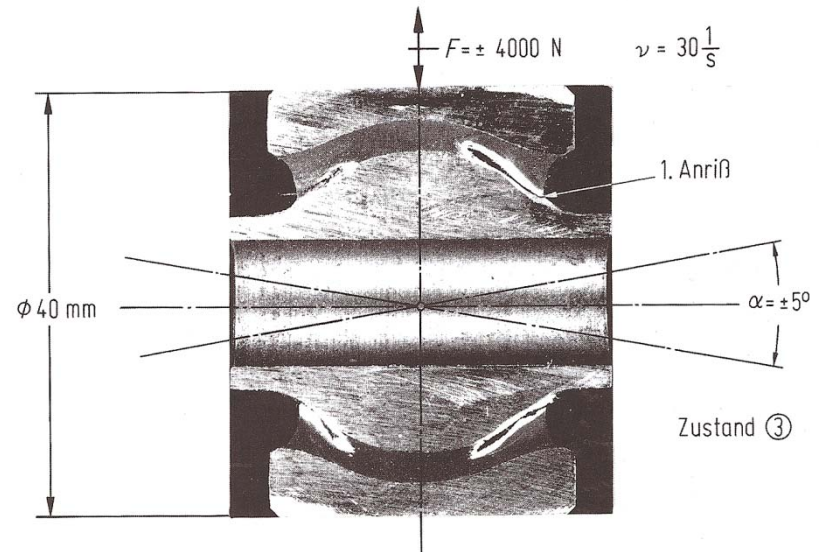
Reduzierung der Kerbspannungen in P durch vorgelagerte Sekundärbereiche

während Schweißprozess

Erhöhung der Heißrissicherheit in P durch vorgelagerte Sekundärbereiche und angepasste Schweißfolge

Beispiel: Sphärisches Gummigelenk

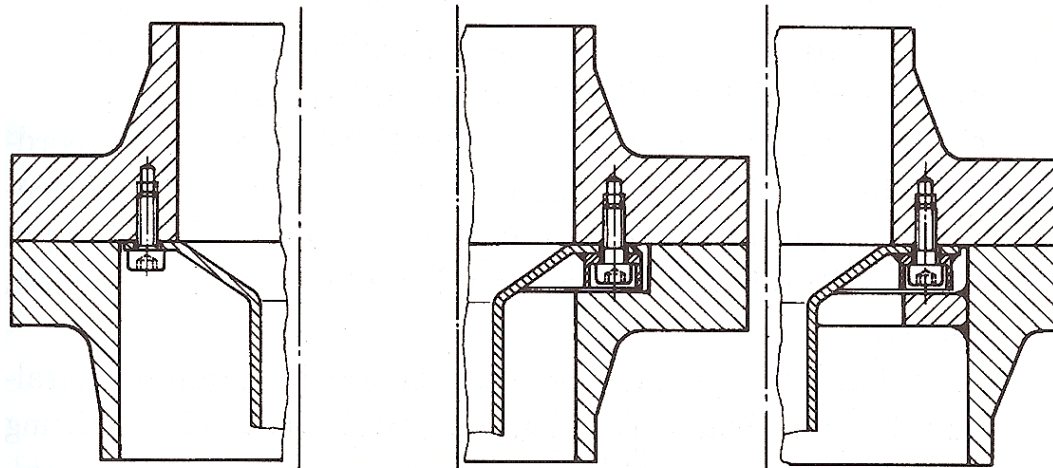
- Beim ersten Anriß ist die Funktions-sicherheit noch gewährleistet. Erst ab einer Lastspielzahl von 2×10^6 sinkt die Federsteifigkeit erheblich und zeigt z.B. durch Veränderung der kritischen Drehzahl und damit der Eigenfrequenz den Schädigungszustand an.
- Ähnlich verhalten sich Kugellager, die ihre Funktionseinschränkung lange vor dem eigentlichen Funktionseinbruch durch Geräusche anzeigen



Risszustand und Abhängigkeit der Federsteifigkeit von der Lastspielzahl

Beispiel: Befestigung von Einbauten

- Bei fail-safe-Konstruktionen spielt die Vermeidung von Folgeschäden eine bedeutende Rolle. Im gezeigten Beispiel wird durch die formschlüssige Anordnung erreicht, dass selbst bei Abreißen der Schrauben infolge Schwingungen die Einbauten ihre Funktion – zwar in eingeschränktem Rahmen – bewahren und die Bauelemente am ursprünglichen Platz bleiben.



Befestigung von Einbauten

- Voraussetzungen für eine fail-safe-Konstruktion sind:

Prinzipien der redundanten Anordnung

- Übersetzen kann man Redundanz mit Überschuss.
- Bezogen auf den Maschinebau bedeutet Redundanz eine Mehrfachanordnung von Funktionsträgern:

- Dabei darf das ausfallende Systemelement von sich aus keine Gefahr für das System bedeuten. Das für die Funktionserhaltung eintretende Systemelement kann die Funktion voll oder eingeschränkt (bis zur Außerbetriebnahme) erfüllen.

- Man unterscheidet zwischen:

Aktive Redundanz

Das Redundanzelement ist bereits im Normalfall im Einsatz. Für diesen Normalfall nehmen alle Elemente aktiv an der Funktionserfüllung teil. Der Ausfall eines Elements kann mit einer entsprechenden Leistungsminderung einhergehen.

Passive Redundanz

Es werden in Reserve stehende Einheiten bereitgestellt, die bei Ausfall den aktiven Einheiten zugeschaltet werden. Dadurch ist im Vergleich zur aktiven Redundanz die Ausfallrate des Redundanzelements erheblich verringert. Dabei muss die

Beispiele:

- Voraussetzungen für redundant ausgeführte Konstruktionen sind:
 - Die redundante Anordnung kann nicht das safe-life- oder fail-save-Prinzip ersetzen. Zwei Seilbahnen statt einer haben keine Auswirkung auf die Sicherheit der zu fördernden Personen.
 - Zudem machen z.B. mehrere verrottende Gummischläuche oder gleichzeitig rostende Schrauben das System nicht sicherer, weshalb kein Redundanz-Prinzip vorliegt.

- Aus diesem Sachverhalt heraus ist zu empfehlen:
dass heißt, Mehrfachanwendungen für die gleiche Funktion sollten möglichst nach verschiedenen Wirkprinzipien aufgebaut sein.
- Insbesondere für Sicherheitseinrichtungen und den Aufbau von Schutzsystemen ist dieses Prinzip zu bevorzugen.

- Redundante Schaltungen können je nach Anforderung unterschiedlich ausgeführt werden.

Parallel-Redundanz

Regelbetrieb:

Ausfall:

Anwendung:

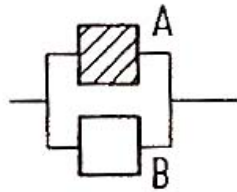
Serien-Redundanz

Regelbetrieb:

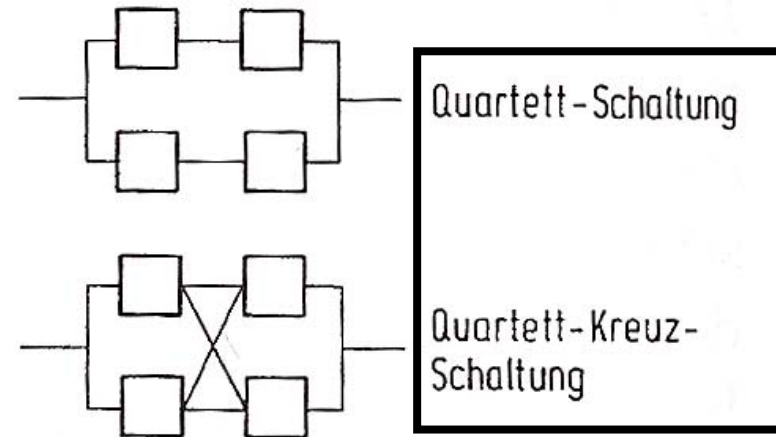
Ausfall:

Anwendung:

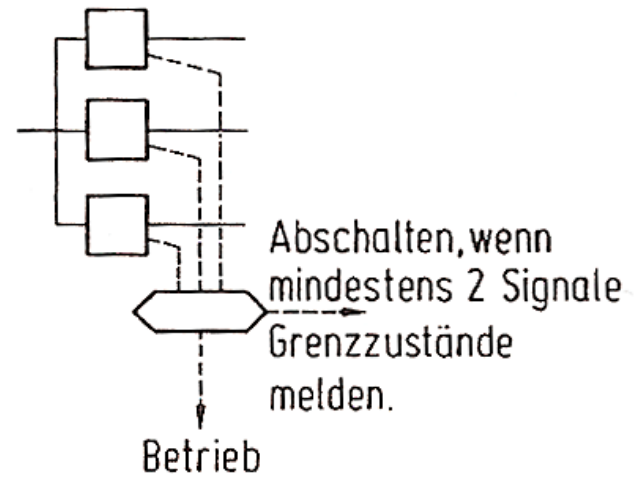
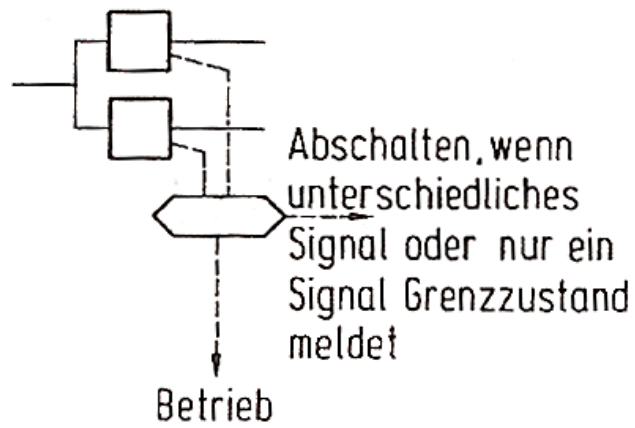
Weitere Redundante Schaltungen (1)



Prinzip-Redundanz
in Parallelschaltung
Wirkprinzip von A
verschieden von B

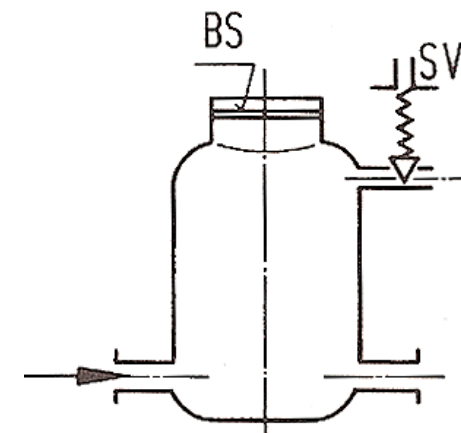
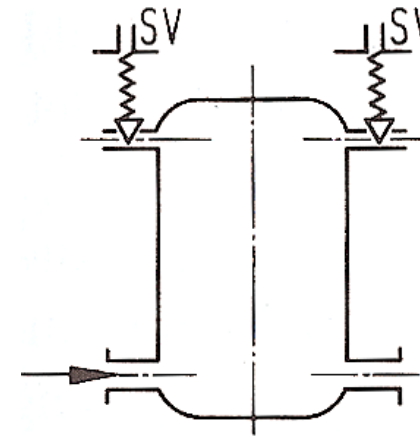


Weitere Redundante Schaltungen (2)



Beispiel: Überdrucksicherung an Druckbehälter

- In der oberen Abbildung verfügt der Behälter über zwei Sicherheitsventile mit demselben Wirkprinzip. Damit weisen beide Ventile das gleiche Ausfall- und Fehlerverhalten auf
- In der unteren Abbildung basieren beide Sicherheitselemente auf unterschiedlichen Wirkprinzipien, wodurch eine gleichzeitiger Ausfall unwahrscheinlich ist.



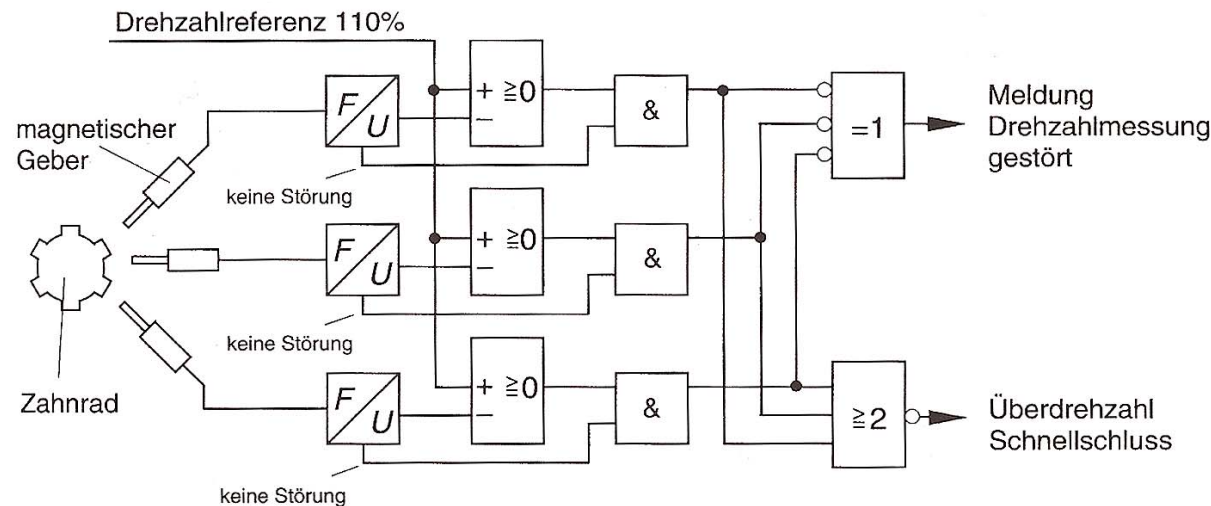
Zweifache redundante Anordnung von Schutzorganen gegen hohen Innendruck

Beispiel: Drehzahlregelung bei einer Dampfturbine (1)

- Die Drehzahlregelung und insbesondere der Schutz vor Überdrehzahl bei Turbinen ist in mehrfach redundant.

Beispiel: Drehzahlregelung bei einer Dampfturbine (2)

- Das elektronische Drehzahlregelsystem ist mit einem Gebersystem nach Auswahl- und Vergleichsredundanz aufgebaut. Die drei gleichen, aber unabhängigen Impulse werden jeder für sich mit dem Referenzsignal verglichen. Der Vergleich erfolgt nach der 2 – aus 3 – Auswahl, bei Nichtübereinstimmung der Messwerte wird eine Meldung abgegeben.



Drehzahlregelung in redundanter Anordnung