







Standardportale für den Anbau
handelsüblicher Knickarmroboter

Lastannahmen & Festlegungen für die Nachweisführung

Lukas Steiner, Schmied Engineering GmbH, CH-4563 Gerlafingen
www.schmied-engineering.ch






Inhaltsverzeichnis

-  Wir über uns
-  Einstieg ins Thema
-  Zuordnung der Roboter zu den Portalen
-  Ermittlung der Roboterlasten
-  Belastungen auf die Portalkomponenten
-  Nachweisführung

Wir über uns

Wir über uns

Schmied Engineering GmbH

-  Ingenieurbüro seit 1996 spezialisiert auf Festigkeitsberechnungen in der Produktentwicklung von der Konzeptfindung bis zur Schadensuntersuchung.
-  3 Berechnungsingenieure
-  Seit Oktober 2008 Bürogemeinschaft mit CADFEM Büro Mittelland.
-  Beat Schmied Dozent an der BFH Burgdorf für FEM und Festigkeitslehre sowie Betreuer von Studentenprojekten und Thesis-Arbeiten.
-  Lukas Steiner ebenfalls im FEM-Unterricht an der BFH Burgdorf tätig.

Wir über uns Beispiele



Schwerlastportale & Robotik
Festigkeitsnachweise, Konstruktionsunterstützung



Gepäcksortierung
Schadenuntersuchung & Problemlösung



Vakuumventil
Schadenuntersuchung & Problemlösung






Operationstisch
Festigkeitsnachweis



Starkstromkomponente
Erdbebennachweis

Wir über uns Festigkeitsnachweis für Schweissnähte

-  Wie ein roter Faden zieht sich in den letzten Jahren der Festigkeitsnachweis für Schweissnähte durch sehr viele Aufträge in unterschiedlichsten Bereichen.
-  Beat Schmied ist nun Referent für das 3-tägige CADFEM-Seminar „Betriebsfestigkeit von Schweissnähten“.
-  Unter Leitung von Beat Schmied läuft bereits das zweite Studentenprojekt an der BFH Burgdorf in Zusammenarbeit mit CADFEM und der FHNW (Peter Fritzsche).

Einstieg ins Thema

Einstieg ins Thema

Roboter-Portale TM-O

GÜDEL

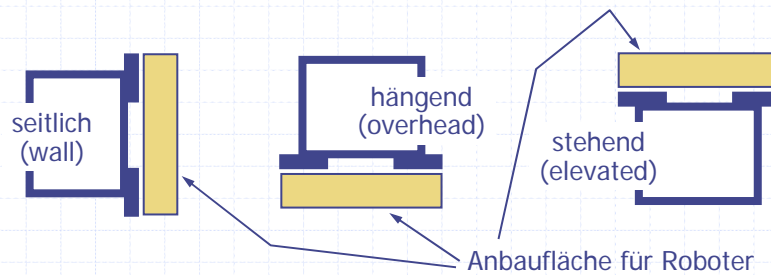
1-feldrige oder mehrfeldrige Portale für den Anbau von 1, 2 oder mehr Robotern



Einstieg ins Thema

Baugrößen, Anbauvarianten

- Die Portale sind in vier Baugrößen verfügbar.
- Bei jeder Baugröße sind drei Anbauvarianten möglich.
- Alle auf dem Markt erhältlichen Roboter sind, abhängig von der Anbauvariante, den Portal-Baugrößen zugeordnet.



Einstieg ins Thema

Robotertypen

Grosse Vielfalt an Robotertypen für verschiedene Applikationen.



Traglast: 80 kg
Masse: 540 kg
A1-A3: 170°/s



Traglast: 100 kg
Masse: 1200 kg
A1-A3: 105°/s







Traglast: 150 kg
Masse: 900 kg
A1-A3: 100°/s

Einstieg ins Thema

Herstellerangaben zu Roboterlasten

Die Lastangaben der Roboterhersteller sind meist ungenügend.





-  Die Lastangaben beschränken sich oft auf den Notstopp.
-  Fast ausnahmslos sind nur die Maximalwerte der einzelnen Lastkomponenten bekannt. Diese treten jedoch nie gleichzeitig auf.
-  Die Lastangaben der Hersteller beinhalten sehr unterschiedliche Reserven und Sicherheitsfaktoren.
-  Die Verwendung der Maximallasten führt zu sehr konservativen Portalkonstruktionen.

Einstieg ins Thema

Variable Parameter ohne Ende

Nebst den 4 Baugrößen mit den 3 Anbauvarianten gibt es viele variable Größen, welche für die Nachweisführung relevant sein können.

Portalspezifische Gegebenheiten




-  1-feldriges oder mehrfeldriges Portal
-  Höhe der Linearachse über Boden (Stützenhöhe)
-  zugeordnete(r) Roboter (Masse, Kinematik, Dynamik)
-  Anbau von 1 oder 2 Robotern

Variable Größen im Betrieb

-  Prozessbewegungen Roboter und Linearachse

Einstieg ins Thema

Zielsetzung

-  Pro Portalgrösse sollen allgemeingültige, auf die Roboteranbaufläche bezogene Maximallasten definiert werden.
-  Eine einheitliche, möglichst einfache Methode zur Nachweisführung ist zu definieren.
-  Die Nachweismethode soll auf alle sicherheitsrelevanten Bauteile adaptierbar sein:
 - Laufwagen inklusive Rollen
 - Schweisskonstruktionen (Träger, Stützen)
 - Trägerstoss
 - Trägerbefestigung an Stützen

Zuordnung Roboter - Portalgrösse

Alle marktgängigen Roboter sind abhängig von der Anbauvariante einer Portalgrösse zuzuordnen.

Zuordnung

Vorgehen

1. Kinematisches Robotermodell

Wegen den meist unvollständigen Herstellerangaben sind für die fehlenden Angaben einheitliche Annahmen zu treffen und in ein Modell umzusetzen.

2. Roboter-Datenbank in Excel

Die im kinematischen Modell benötigten Parameter werden für alle marktgängigen Roboter erfasst.

3. Grenzkurven der Portale




Definition der zulässigen Belastungen durch die Roboter.

4. Zuordnung der Roboter zu den Portalen


Zuordnung

Kinematisches Modell für Roboter

Aus den Herstellerangaben werden entnommen:

-  Geometrie (Armlängen, Drehpunktlagen)
-  Gesamtgewicht, Nutzlast
-  maximale Achsengeschwindigkeiten

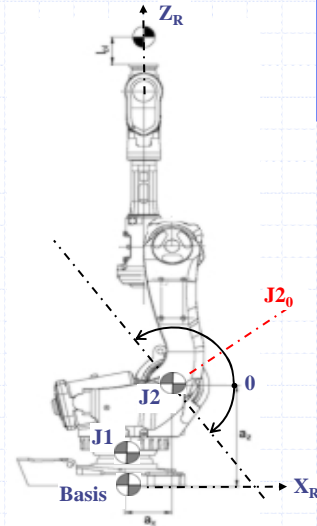
Gestützt auf Roboter, von denen detaillierte Angaben vorliegen, werden abgeleitet:

-  Gewichtsverteilung auf Hauptkomponenten und deren Schwerpunkte
-  maximale Winkelbeschleunigungen

Zuordnung

Kinematisches Modell

- Schwinde und Vorderarm werden immer ausgestreckt angenommen.
→ verbleibende Freiheitsgrade
J1 (Drehteller), J2 und Linearachse
- Schwenkbereich für Achsen
J1: $\pm 90^\circ$ (0° quer zur Linearachse)
J2: $+30^\circ \pm 90^\circ$
- Ermittlung der Fusspunktbelastungen über den gesamten Arbeitsbereich mit jeweils maximalen Beschleunigungen (Mathcad).
- Beschleunigungslastfälle mit Dynamikfaktor $f_{\text{dyn}} = 1.2$



Zuordnung

Grenzkurven und Zuordnung

- Die Rollen/Schienen der Linearachse sollen die limitierenden Bauteile sein.
- Orthogonal- und Lateralrollen sind unabhängig voneinander. Es verbleiben zwei Kopplungen:
Vertikalkraft - Kippmoment
Querkraft - Torsionsmoment
- Für die Zuordnung sind somit nur zwei extreme Armstellungen relevant.

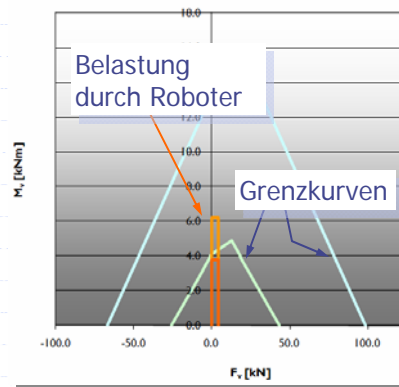


Diagramm für
Vertikalkraft - Kippmoment

Ermittlung der Roboterlasten

Lasten bezogen auf Anbaufläche des Laufwagens

Roboterlasten

Vorgehen

1. Maximallasten des einzelnen Roboters

- 1.1 Definition der Einzellastfälle
- 1.2 Berechnung der Einzellastfälle über Schwenkbereich
- 1.3 Überlagerung der Einzellastfälle über Schwenkbereich
- 1.4 Maximalwerte auf Anbaufläche des Laufwagens

2. Maximalwertbildung über alle Roboter

3. Festlegungen



- 3.1 Lasten für statische Nachweise
- 3.2 Lastvariationen für Ermüdungsnachweise
- 3.3 Lastannahme bei Portalen mit zwei Robotern

Roboterlasten - Einzelroboter

Definition der Einzellastfälle

1. Eigengewicht des Roboters
2. Lineare Beschleunigung der Portalachse (a_{y_max})
3. Winkelbeschleunigung J1 (Drehteller, α_{J1_max})
4. Winkelbeschleunigung J2 (Schwinge, α_{J2_max})

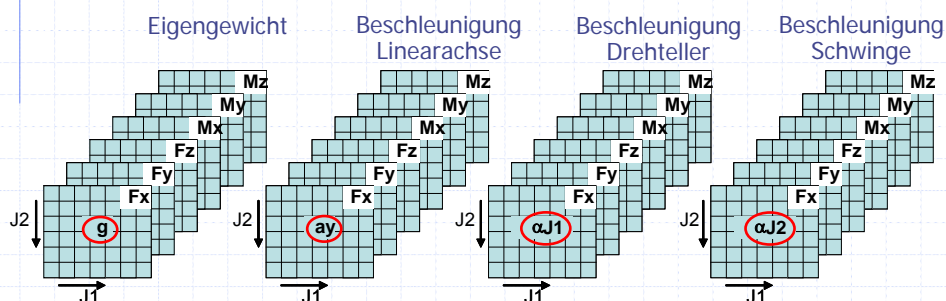
Hinweise zu den Lastfällen 2 bis 4:

-  Diese Lastfälle stellen den Notaus dar. Die Verzögerungen wurden entsprechend definiert.
-  Zusätzlich wird ein Dynamikfaktor f_{dyn} angewendet

Roboterlasten - Einzelroboter

Berechnung der Einzellastfälle

Über den ganzen Schwenkbereich von J1 und J2 werden für jeden Lastfall die Belastungen auf den Fusspunkt ermittelt.



Überlagerungsmethoden

ABSSUM-Methode (Absolute Sum)

$$u_{\max} = u_{\text{stat}} \pm \sum |u_{\text{dyn}_i}|$$

Summation der einzelnen Beträge.

→ sehr konservativ

SRSS-Methode (Square Root of Sum of Squares)

$$u_{\max} = u_{\text{stat}} \pm \sqrt{\sum u_{\text{dyn}_i}^2}$$

Diese Methode wird oft bei Erdbeben-Nachweisen verwendet, zur Überlagerung der Spektrumsantwort (z.B. Auslenkungen).

SRSS-Methode für Roboterlasten

Im Kinematik-Modell wird immer der voll ausgestreckte Arm untersucht. Infolge der Leistungsgrenzen der Antriebsstränge kann jedoch ausgeschlossen werden, dass die Achsen J1 und J2 bei diesem Zustand beide noch maximal beschleunigen oder verzögern können.

Aus dem gleichen Grund wird die Linearachse sicher nie die maximale Dynamik bei ausgestrecktem Arm ausnutzen.

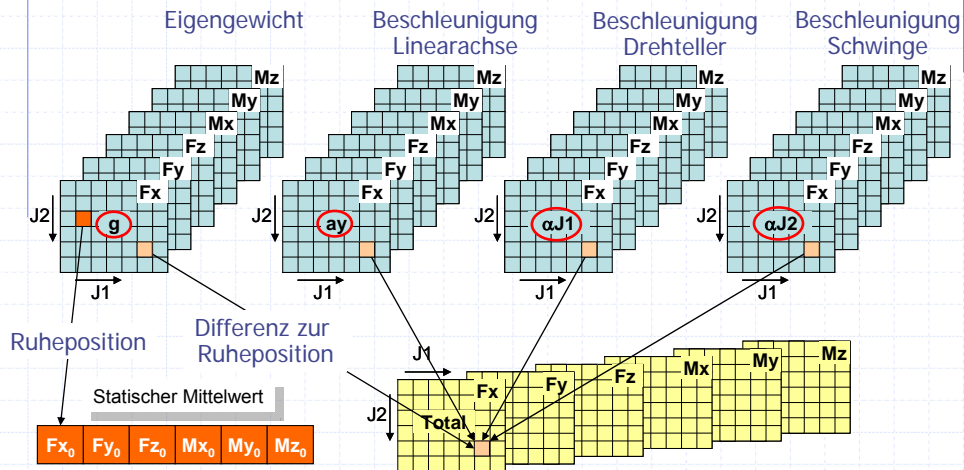
Die dynamischen Einzellasten werden deshalb mit der SRSS-Methode überlagert.

$$F_{\text{xyz}} = F_{\text{xyz}_g} + \sqrt{F_{\text{xyz}_ay}^2 + F_{\text{xyz}_\alpha J1}^2 + F_{\text{xyz}_\alpha J2}^2}$$

$$M_{\text{xyz}} = M_{\text{xyz}_0} + \sqrt{(|M_{\text{xyz}_g}| - |M_{\text{xyz}_0}|)^2 + M_{\text{xyz}_ay}^2 + M_{\text{xyz}_\alpha J1}^2 + M_{\text{xyz}_\alpha J2}^2}$$

Roboterlasten - Einzelroboter

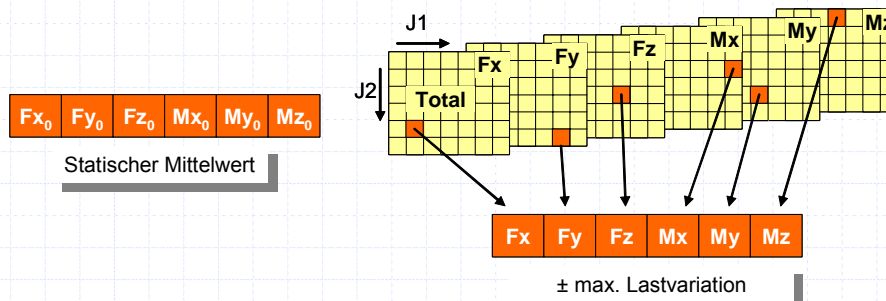
Überlagerung pro Armposition



Roboterlasten - Einzelroboter

Maximalwerte des Roboters

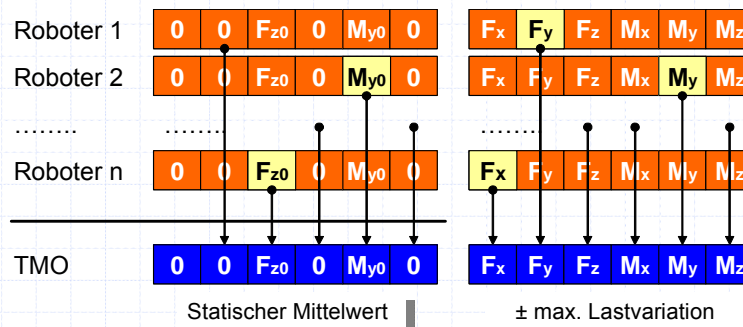
Aus den Tabellen wird für jede Lastkomponente der Maximalwert ermittelt. Trotz der kinematischen Abhängigkeiten treten die Maximalwerte bei verschiedenen Schwenkwinkeln auf.



Roboterlasten - Maxima über alle Roboter

Maximale Belastungen pro Portal



Aus der Liste der zugeordneten Roboter sind jene auszuwählen, die für das Portal dimensionierend sein könnten. Diese werden wie beschrieben analysiert und danach der absolute Maximalwert für jede Lastkomponente gesucht.



Roboterlasten - Festlegungen

Lasten für statischen Nachweis

Die nach dem vorgängig beschriebenen Prozedere ermittelten Lastkomponenten repräsentieren den Notausfall. Mit diesen Werten ist der statische Nachweis zu führen. In ihrer Gesamtheit dürfen sie als konservativ gelten:

-  Bereits die 6 Lastkomponenten des einzelnen Roboters (Schritt 1.4) können wegen unterschiedlichen Armstellungen nie gleichzeitig auftreten.
-  Wegen den unterschiedlichen Bauweisen und Applikationen stammen die für das Portal massgebenden 6 Lastkomponenten immer von mehreren Robotern.

Bei den Nachweisen dürfen somit gleichartige Wirkungen der Lastkomponenten mit der SRSS-Methode überlagert werden.

Roboterlasten - Festlegungen

Lasten für Ermüdungsnachweis

Gestützt auf die Auswertung einiger Roboter, von denen die Dauerwerte bekannt sind, werden die Normalbetriebslasten von den Notauswerten abgeleitet.

Dynamische Maximallast

$$FM_{NB_dyn_max} = 0.6 \cdot FM_{NS_dyn_max}$$

Dynamische Minimallast

$$FM_{NB_dyn_min} = -0.3 \cdot FM_{NS_dyn_max}$$

Daraus folgen Lastamplitude und Mittellast

$$FM_a = 0.45 \cdot FM_{NS_dyn_max}$$
$$FM_m = FM_{stat} + 0.15 \cdot FM_{NS_dyn_max}$$

Roboterlasten - Festlegungen

Lasten bei zwei Robotern

Falls am gleichen Portal zwei Roboter angebaut sind und diese unabhängig voneinander arbeiten, wird der zweite Roboter wie folgt berücksichtigt:

- Beide Roboter werden auf der Linearachse am gleichen Punkt angenommen und ihre Massen addiert.
- Die dynamischen Lasten des zweiten Roboters werden auf 40% reduziert angenommen (asynchrone Bewegungen).

Die Reduktion der dynamischen Lasten basiert wiederum auf der SRSS-Methode.

$$F_{Rges} = \sqrt{F_{R1}^2 + F_{R2}^2} = \sqrt{2 \cdot F_{R1}^2} = 1.4 \cdot F_{R1}$$

Belastungen auf die Portalkomponenten

Portalbelastungen

Position der Linearachse

Für die Festigkeitsnachweise der stationären Bauteile (Y-Träger, Stützen) werden die Schnittlasten an den zu beurteilenden Stellen benötigt. Diese sind abhängig von:

- 📄 **Portalgeometrie** (Felderanzahl, Stützenweiten, Stützenhöhe, Träger- und Stützensteifigkeiten)
- 📄 **Y-Position des Roboters** (nicht für alle 6 Lastkomponenten identisch)

Theoretisch korrekt wäre, für jedes zu beurteilende Bauteil die ungünstigste Y-Position zu suchen. Dieser Weg erwies sich als sehr umständlich.

Portalbelastungen

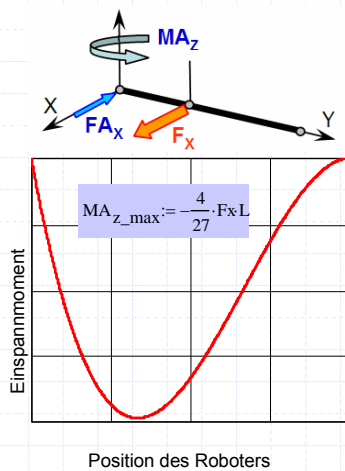
Vorgehen

1. **Analytische Berechnung der Lastreaktionen**
am 1-feldrigen, beidseitig starr eingespannten Träger.
2. **Ermittlung der Elastizitätsfaktoren**
für das Portal bei 3 Wagenpositionen
 - Pos1: Wagen direkt oder nahe bei der Stütze
 - Pos2: Wagen bei $(0.3-0.5) \cdot$ Stützenweite
 - Pos3: Wagen in der Feldmitte
3. **Massgebende Lasten auf Trägerkomponente**

Beispiel: Roboter in Position 2 erzeugt horizontale Querkraft F_x

Portalbelastungen - starr eingespannter Träger

Analytisches Modell - Stützenbelastung



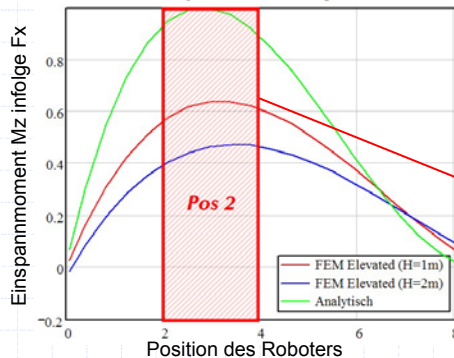
Übertragungsmatrix für die Stützenbelastung unter Annahme des beidseitig starr eingespannten Trägers.

$$\begin{pmatrix} FA_{x_starr} \\ FA_{y_starr} \\ FA_{z_starr} \\ MA_{x_starr} \\ MA_{y_starr} \\ MA_{z_starr} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3}{2 \cdot Ls} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{3}{2 \cdot Ls} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4 \cdot Ls}{27} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{4 \cdot Ls}{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}$$

Portalbelastungen - Elastizitätsfaktoren

Elastizitätsmatrix - Roboter in Position 2

In einem Balkenmodell in ANSYS Workbench werden Stützenweiten und Stützenhöhen variiert und für jede Lastkomponente die maximale Stützenbelastung ins Verhältnis zur starren Einspannung gesetzt.



Abstufung der Faktoren in 0.2-Schritten.

$$\text{aRedFact_Pos2} := \begin{pmatrix} 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{pmatrix}$$

Portalbelastungen - Lasten auf Träger

Massgebende Stützenbelastung

Die Multiplikation der analytisch berechneten Belastung mit den Elastizitätsfaktoren liefert die massgebenden Lasten.

$$\begin{pmatrix} \text{FA}_{x_Pos2} \\ \text{FA}_{y_Pos2} \\ \text{FA}_{z_Pos2} \\ \text{MA}_{x_Pos2} \\ \text{MA}_{y_Pos2} \\ \text{MA}_{z_Pos2} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{FA}_{x_starr} \\ \text{FA}_{y_starr} \\ \text{FA}_{z_starr} \\ \text{MA}_{x_starr} \\ \text{MA}_{y_starr} \\ \text{MA}_{z_starr} \end{pmatrix}$$

Nachweisführung

Nachweisführung

Vorgehen

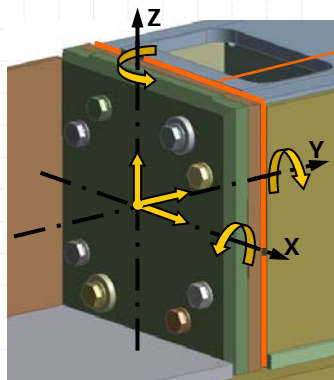
- 1. Bauteilbeanspruchung**
für jede Lastkomponente des Roboters:
 - Hauptspannungen im Gusswagen
 - max. Hauptspannung in Schweissnaht
 - Axial- und Querkraft auf Schraube
- 2. Überlagerung der Beanspruchungen**
mit SRSS-Methode (die 6 Lastkomponenten wirken nie gleichzeitig maximal)
- 3. Statischer Festigkeitsnachweis**
- 4. Ermüdungsnachweis**

Beispiel: Schweissnaht zwischen Träger und Stossplatte.

Nachweisführung

Beispiel Schweissnaht Trägerstoss

Jede Roboter-Lastkomponente bewirkt entsprechende Belastungen im Trägerstoss.



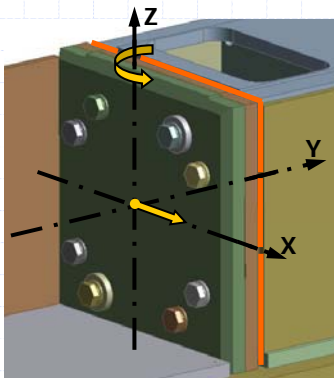
Für die Schweissnaht ist der Festigkeitsnachweis zu führen. Nach FKM ist dabei die Normalspannungshypothese zu verwenden.

$$\sigma_{\max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

Nachweisführung - Einzelbeanspruchung

Beanspruchung pro Lastkomponente

Im Nahtquerschnitt wird für jede Roboter-Lastkomponente die maximale Hauptspannung ermittelt.



Z.B. bewirkt eine Roboterkraft F_x im Stoss ein Biegemoment MA_z und eine Querkraft FA_x .

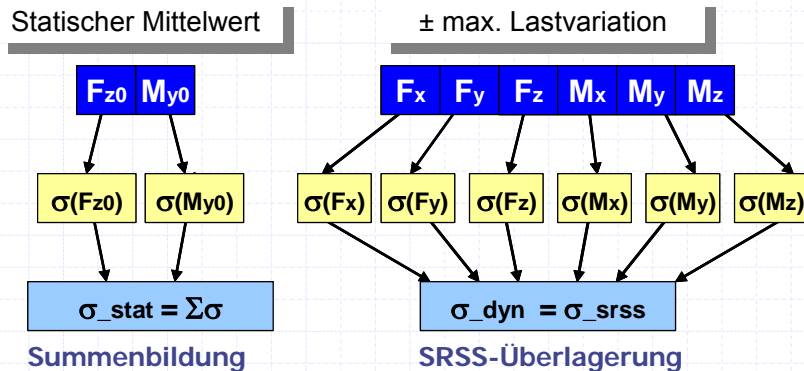
Maximale Hauptspannung:

$$\sigma_{\max_{Fx}} = \frac{|\sigma_{MAz}|}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{MAz}}{2}\right)^2 + \tau_{FAx}^2}$$

Nachweisführung - Überlagerung

Überlagerung der Hauptspannungen

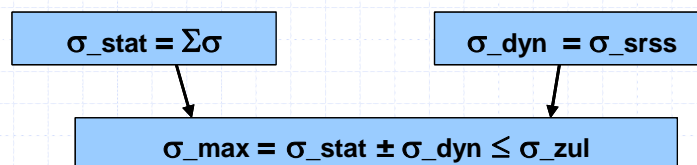
Da die 6 Hauptspannungen nie gleichzeitig maximal sein können, werden sie mit der SRSS-Methode überlagert.



Nachweisführung – Festigkeitsnachweis

Statischer Festigkeitsnachweis

Für die maximale Gesamtbelastung aus Eigenlast und dynamischem Anteil wird der statische Festigkeitsnachweis geführt.

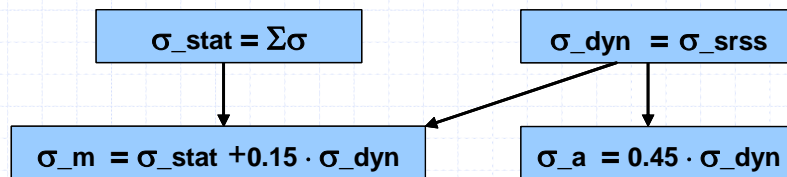


Nachweisführung z.B. nach der FKM-Richtlinie.

Nachweisführung – Festigkeitsnachweis

Ermüdungsnachweis

Die Spannungsvariation wird gemäss den Definitionen für die Ermüdungslasten von den Maximalspannungen bei Notaus abgeleitet.



Nachweisführung z.B. nach der FKM-Richtlinie.

Nachweisführung

Betriebsfestigkeit

Mit dem beschriebenen Vorgehen wird angenommen, dass alle Belastungen synchron und proportional sind. Was in der Realität aber sicher nicht zutrifft.

Zeitlich veränderliche Hauptspannungsrichtungen haben erfahrungsgemäss eine erhöhte Schädigungswirkung.

Dies wird im vorliegenden Fall berücksichtigt, indem der Betriebsfestigkeitsfaktor nach FKM $K_{BK}=1$ gesetzt wird. Somit wird der Dauerfestigkeitsnachweis immer mit den grössten Lastamplituden geführt.