

# FKM QUICKCHECK

STZ-Verkehrstechnik / Germany



# Inhalt

<b>1.</b>	<b>winLIFE QUICK CHECK</b>	<b>6</b>
1.1.	Möglichkeiten und Ziele.....	6
1.2.	Nachweise nach FKM-Richtlinie .....	6
1.2.1.	Anwendungsbereich (0.0) .....	7
1.2.2.	Grundlagen (0.1) .....	7
1.2.3.	Erforderliche Nachweise (0.2) .....	7
1.2.4.	Spannungen und Bauteilarten (0.3).....	8
1.2.5.	Spannungskennwerte (0.3.1).....	8
1.2.6.	Nennspannungen (0.3.2) .....	8
1.2.7.	Örtliche Spannungen (0.3.3) .....	8
1.2.8.	Einachsige und mehrachsige Spannungen (0.3.4).....	9
1.3.	Nachweis der Dauerfestigkeit für den nicht proportionalen Fall (NICHT in FKM geregelt)10	
1.3.1.	Berechnungsablauf (0.4) .....	11
<b>2.</b>	<b>Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach FKM (3)</b>	<b>15</b>
2.1.	Allgemeines (3.0) .....	15
2.1.1.	Geschweißte Bauteile .....	15
2.2.	Spannungskennwerte (3.1) .....	16
2.2.1.	Allgemeines (3.1.0).....	16
2.2.2.	Nichtgeschweißte Bauteile (3.1.1) .....	16
2.2.3.	Geschweißte Bauteile (3.1.2) .....	18
2.3.	Werkstoffkennwerte (3.2).....	23
2.3.1.	Allgemeines (3.2.0).....	23
2.3.2.	Nichtgeschweißte Bauteile (3.2.1) .....	23
2.3.3.	Geschweißte Bauteile (3.2.2) .....	33
2.4.	Konstruktionskennwerte (3.3) .....	35
2.4.1.	Allgemeines (3.3.0).....	35
2.4.2.	Nicht geschweißte Bauteile (3.3.1) .....	35
2.4.3.	Geschweißte Bauteile (3.3.2) .....	36
2.5.	Bauteilfestigkeit (3.4).....	42
2.5.1.	Allgemeines (3.4.0).....	42
2.5.2.	Nicht geschweißte Bauteile (3.4.1) .....	42
2.5.3.	Geschweißte Bauteile(3.4.2) .....	42
2.6.	Sicherheitsfaktoren (3.5) .....	43
2.6.1.	Allgemeines (3.5.0).....	43
2.6.2.	Einzel-Sicherheitsfaktoren (3.5.1).....	44
2.6.3.	Gesamtsicherheitsfaktor (3.5.2) .....	46
2.7.	Nachweis (3.6).....	46
2.7.1.	Allgemeines (3.6.0).....	46

2.7.2.	Nichtgeschweißte Bauteile (3.6.1) .....	47
2.7.3.	Geschweißte Bauteile (3.6.2) .....	47
<b>3.</b>	<b>Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM (4)</b>	<b>51</b>
3.1.	Allgemeines (4.0) .....	51
3.2.	Spannungskennwerte (4.1) .....	51
3.2.1.	Allgemeines (4.1.0) .....	51
3.2.2.	Nichtgeschweißte Bauteile (4.1.1) .....	51
3.2.3.	Geschweißte Bauteile (4.1.2) .....	52
3.2.4.	Wöhlerlinienkennwerte (4.1.3) .....	52
3.2.5.	Anpassung des Spannungskollektivs an die Bauteil-Wöhlerlinie (4.1.4).....	53
3.2.6.	Umrechnung auf Äquivalentspannungsamplitude (4.1.5) .....	54
3.3.	Werkstoffkennwerte (4.2).....	54
3.3.1.	Nichtgeschweißte Bauteile (4.2.1) .....	54
3.3.2.	Geschweißte Bauteile (4.2.2) .....	54
3.4.	Konstruktionskennwerte (4.3) .....	56
3.4.1.	Nichtgeschweißte Bauteile (4.3.1) .....	56
3.4.2.	Kerbwirkungszahlen (4.3.1.2) .....	56
3.4.3.	Das bezogene Spannungsgefälle $G_{\sigma}$ (Nennspannung).....	59
3.4.4.	Rauheitsfaktor .....	59
3.4.5.	Geschweißte Bauteile (4.3.2) .....	60
3.4.6.	Randschichtfaktor .....	62
3.4.7.	Schutzschichtfaktor .....	64
3.4.8.	Faktor $KNL,E$ .....	65
3.5.	Bauteilfestigkeit (4.0) .....	66
3.5.1.	Bauteil-Wechselfestigkeit (4.4.1).....	67
3.5.2.	Bauteil-Dauerfestigkeit (4.4.2).....	68
3.5.3.	Mittelspannungsbereich Schubspannungen.....	71
3.5.4.	Mittelspannungsfaktor (4.4.2.4) .....	72
3.5.5.	Bauteil-Betriebsfestigkeit (4.4.3) .....	76
3.5.6.	Bauteil-Wöhlerlinie (4.4.3.4) .....	78
3.5.7.	Betriebsfestigkeitsfaktor – Einstufenkollektiv (4.4.3.5.1).....	79
3.5.8.	Betriebsfestigkeitsfaktor – Mehrstufenkollektiv (4.4.3.5.2).....	80
3.6.	Sicherheitsfaktoren (4.5) .....	81
3.6.1.	Allgemeines .....	81
3.6.2.	Nichtgeschweißte Bauteile.....	81
3.6.3.	Eisen- und Aluminium Gußwerkstoff .....	81
3.6.4.	Geschweißte Bauteile .....	81
3.6.5.	Gesamtsicherheitsfaktor .....	82
3.7.	Nachweis (4.6).....	82
3.7.1.	Allgemeines (4.6.0).....	82
3.7.2.	Einzelne Spannungsarten (4.6.1).....	83
3.7.3.	zusammengesetzte Spannungsarten (4.6.2).....	83
3.7.4.	proportionale und synchrone Spannungen (4.6.2.1).....	83
3.7.5.	Sonderfälle .....	85
3.7.6.	örtliche Spannungen / zusammengesetzt nicht proportional .....	86
3.8.	Dauerfestigkeitsnachweis im allgemeinen Fall (nicht proportional, nicht synchron).....	87
3.8.1.	Motivation für den Dauerfestigkeitsnachweis .....	87
3.8.2.	Theorie des Nachweises der Sicherheit gegen Dauerfestigkeit .....	87
3.8.3.	Dauerfestigkeitsnachweis für Nahtschweißverbindungen.....	90
<b>4.</b>	<b>Benutzeroberfläche QUICK CHECK</b>	<b>95</b>
4.1.	Datei .....	96
4.1.1.	Datei / Neu (Dauerfestigkeit / QUICK CHECK) .....	96

4.1.2.	Datei / Neu (Festigkeitsnachweis FKM / QUICK CHECK)	96
4.1.3.	Datei / Kopieren in normales Projekt	97
4.2.	Wöhlerlinie	97
4.2.1.	Wöhlerlinie Neu	97
4.2.2.	Wöhlerlinie Laden	99
4.2.3.	Wöhlerlinie / Laden FKM	100
4.2.4.	Wöhlerlinie / Editieren	101
4.2.5.	Wöhlerlinie / Editieren professionell	101
4.2.6.	Wöhlerlinie / Wöhlerlinie	101
4.2.7.	Wöhlerlinie / Haigh FKM-Diagramm	102
4.2.8.	Wöhlerlinie / Löschen in der Datenbank	103
4.3.	Berechnung	103
4.3.1.	Ergebnis / Protokoll	106
4.3.2.	Ergebnis / Viewer	106
<b>5.</b>	<b>Beispiel 28 / FKM Beispiel Wellenabsatz</b>	<b>109</b>
5.1.	Aufgabenstellung	109
5.2.	Materialangabe und örtliche Spannungen	109
5.3.	Projektaufbau in winLIFE, Modul QUICK CHECK / FKM	110
5.4.	Ergebnis	117
5.5.	Berücksichtigung von Finite-Elemente-Ergebnisse	119
<b>6.</b>	<b>Beispiel 29 / FKM Beispiel Gussbauteil</b>	<b>123</b>
6.1.	Aufgabenstellung	123
6.2.	Materialangabe und örtliche Spannungen	123
6.3.	Projektaufbau in winLIFE, Modul QUICK CHECK / FKM	124
6.4.	Ergebnis	130
<b>7.</b>	<b>Beispiel 30 / FKM Beispiel Verdichterflansch</b>	<b>135</b>
7.1.	Aufgabenstellung	135
7.2.	Materialangabe und örtliche Spannungen	135
7.3.	Umgebungsbedingungen	136
7.4.	Projektaufbau in winLIFE, Modul QUICK CHECK / FKM	136
7.5.	Ergebnis	141
<b>8.</b>	<b>Beispiel 18 / Dauerfestigkeitsnachweis (winLIFE QUICK CHECK)</b>	<b>145</b>
8.1.	Ablaufbeschreibung an einem Beispiel	145
8.1.1.	Grundregeln bei der Bedienung von winLIFE QUICK CHECK	145
8.1.2.	Start von winLIFE	145
8.1.3.	Erstellen eines Projektes	146
8.2.	Aufgabenstellung	146
8.2.1.	Bauteilgeometrie	146
8.2.2.	Bauteilbelastung (Einheitslasten)	147
8.2.3.	Werkstoffdaten	148
8.3.	Generierung der Wöhlerlinie	148
8.4.	Modellbildung	150
8.5.	Ergebnisse für Spannungen und Auslastungsgrad der einzelnen FE - Berechnungen mit Femap / Nastran	151
8.5.1.	Lastfall Zug	151
8.5.2.	Lastfall Biegung	153
8.5.3.	Lastfall Torsion	155
8.6.	Dauerfestigkeitsnachweis	156

8.6.1.	Zusammenwirken aller Lastfälle .....	156
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>
9.1.	Allgemeine Lebensdauerberechnung.....	161
9.2.	Zahnräder und Lager .....	165
9.3.	Statistik.....	167
<b>10.</b>	<b>Rechtliche Hinweise / Nutzungsbedingungen</b>	<b>171</b>
10.1.	§1 Vertragsgegenstand .....	171
10.2.	§ 2 Nutzungsumfang.....	171
10.3.	§ 3 Kaufpreis, Zahlungsbedingungen .....	172
10.4.	§ 4 Installation, Schulung, Pflege .....	172
10.5.	§ 5 Schutz von Software und Anwendungsdokumentation .....	173
10.6.	§ 6 Weitergabe.....	173
10.7.	§ 7 Mitwirkungs- und Informationspflichten des Käufers.....	173
10.8.	§ 8 Liefer- und Leistungszeit, Höhere Gewalt.....	173
10.9.	§ 9 Sach- und Rechtsmängel, sonstige Leistungsstörungen, Verjährung .....	174
10.10.	§ 10 Haftung .....	175
10.11.	§ 11 Geheimhaltung, Datenschutz .....	175
10.12.	§ 12 Schlussvorschriften.....	176
<b>11.</b>	<b>Glossary of Terms</b>	<b>179</b>
<b>12.</b>	<b>Index</b>	<b>181</b>

# 1. winLIFE QUICK CHECK

---

## 1.1. Möglichkeiten und Ziele

winLIFE FKM QUICKCHECK ermöglicht:

- Nachweise nach **FKM-Richtlinie**: den statischen Nachweis, Ermüdungsfestigkeitsnachweis und Dauerfestigkeitsnachweis für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile für den proportionalen Fall. Der Nachweis nach der FKM bezieht sich immer nur auf EINEN Nachweispunkt.
- Dauerfestigkeitsnachweis für den allgemeinen (auch nicht proportionalen Fall) für nicht geschweißte und geschweißte Bauteile. (NICHT nach FKM). Es kann der Nachweis für ALLE (Oberflächen-) Knoten einer FE-Berechnung geführt werden. Damit ist dieses Vorgehen ist dann besonders geeignet, wenn der kritische Punkt erst gesucht werden soll oder aber eine größere Anzahl von Punkten untersucht werden sollen.

winLIFE FKM QUICKCHECK soll möglichst einfach zu handhaben sein und daher wurde die Dokumentation kurz und möglichst übersichtlich gehalten. Allerdings steht dem Benutzer auch die komplette winLIFE 4.0 2018 -Hilfe aller Module zur Verfügung, Die vollständige Dokumentation wird automatisch mit installiert, die winLIFE FKM QUICKCHECK Dokumentation ist als pdf-Datei auf der CD vorhanden und kann ausgedruckt werden.

---

## 1.2. Nachweise nach FKM-Richtlinie

In dem Berechnungsmodul in winLIFE 4.0 2018 wurde versucht, wesentliche Teile der FKM-Richtlinie 1:1 umzusetzen. Der Teil der FKM-Richtlinie mit Nennspannungen wurde nicht umgesetzt. Im Folgenden wird dies dokumentiert, wobei unmittelbar auf die FKM-Richtlinie Bezug genommen wird. Abweichungen von der FKM-Richtlinie werden angegeben.

Um den unmittelbaren Vergleich mit dem Original zu ermöglichen, wurden die Nummern der Kapitelüberschriften und die Nummerierung der Tabellen der entsprechenden FKM-Kapitel in dieser Dokumentation angegeben. Der Benutzer kann damit unmittelbar Bezug zum Original-Dokument herstellen.

Diese Dokumentation soll und kann nicht die Original-Richtlinie mit all ihren sinnvollen Hinweisen ersetzen, sie soll jedoch den rechentechnischen Ablauf so beschreiben, dass der Anwender ihn nachvollziehen kann. Es mussten der Zielsetzung entsprechend alle Daten und Bezeichnungen der FKM-Richtlinie identisch übernommen werden.

### 1.2.1. Anwendungsbereich (0.0)

Für Bauteile aus Eisen- und Aluminiumwerkstoff, die durch Walzen, Schmieden, Gießen oder spanabhebende Bearbeitung oder durch Schweißen hergestellt wurden.

Die FKM-Richtlinie ist anwendbar für folgende Bauteiltemperaturen und Werkstofffestigkeiten:

Werkstoff	Temperaturbereich [°C]	Max. Festigkeit [MPa]
Stahl	-40 bis 500	1250
Eisengusswerkstoff	-25 bis 500	
Aluminiumwerkstoff	-25 bis 200	610

### 1.2.2. Grundlagen (0.1)

### 1.2.3. Erforderliche Nachweise (0.2)

Bei rein statischer Beanspruchung ist der statische Nachweis ausreichend, bei Ermüdungsbelastung sind IMMER der statische und der Ermüdungsfestigkeitsnachweis erforderlich.

Der Nachweis der FKM-Richtlinie bezieht sich auf EINEN Nachweispunkt. In dem Bestreben, die FKM-Richtlinie in winLIFE 4.0 2018 möglichst genau abzubilden, wird die Berechnung auch für diesen EINEN Nachweispunkt durchgeführt. Alle Angaben und Daten des Benutzers beziehen sich daher auf diesen.

Oftmals ist jedoch der Punkt, für den der Nachweis geführt werden soll, nicht bekannt und es muß im ersten Schritt dieser Punkt gesucht werden. Um dies zu ermöglichen, wird in winLIFE 4.0 2018 folgende Vorgehensweise praktiziert.

---

Statt eines Nachweispunktes kann eine Datei aus einer FE-Analyse mit Spannungsergebnissen gewählt werden, die (fast) beliebig viele (Oberflächen-) Knotenpunkte enthalten kann. Der Benutzer kann nun alle diese Punkte berechnen. Dabei werden die von ihm für den EINEN Nachweispunkt gemachten Eingabedaten für alle Punkte verwendet. Das Ergebnis ist damit streng genommen nur für den Nachweispunkt korrekt. Diese Vorgehensweise hilft jedoch, die kritischen Bereiche mit wenig Eingabeaufwand einzugrenzen.

---

Die Nachweise sind für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5 % konzipiert.

## 1.2.4. Spannungen und Bauteilarten (0.3)

### 1.2.5. Spannungskennwerte (0.3.1)

Die Spannungskennwerte sind für den Nachweispunkt zu ermitteln. Es sind geschweißte und nicht geschweißte Bauteile zu unterscheiden. Die Spannungen können analytisch bestimmt oder mittels linear elastischer finite Elemente Methode oder der Randelemente Methode ermittelt werden.

Alle Spannungen – auch die Spannungsamplituden - sind zunächst vorzeichenbehaftet. Das Vorzeichen der Spannungsamplituden spielt nur bei der Überlagerung mehrerer Spannungskomponenten eine Rolle.

Im Nachweispunkt werden nur örtliche Spannungen betrachtet.

Entsprechend werden auch die Bauteilfestigkeitswert (ertragbare Spannungen) nur als örtlichen Spannungen bestimmt.

### 1.2.6. Nennspannungen (0.3.2)

---

Nennspannungen werden – im Gegensatz zur FKM-Richtlinie – in winLIFE FKM QUICKCHECK nicht behandelt.

---

### 1.2.7. Örtliche Spannungen (0.3.3)

#### 1.2.7.1. *Nichtgeschweißte Bauteile (0.3.3.1)*

Es werden nur linear elastische Spannungen betrachtet. Es wird angenommen, dass die kritischen Nachweispunkte in der Oberfläche liegen.

Die Spannungskomponenten können vom Benutzer manuell eingegeben werden.

Wenn die Spannungen manuell eingegeben werden, sollte das Koordinatensystem im Nachweispunkt weist eine z-Achse senkrecht zur Oberfläche aufweisen und in das Bauteilinnere zeigen. Der Normaleneinheitsvektor muß dann in der x-y-Ebene liegen.

Es liege ein ebener Spannungszustand vor, wenn keine Last (z.B. auch bewirkt durch Randbedingung, Kontakt) in der Oberfläche eingeleitet wird, so dass  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  ungleich Null sein können während  $\sigma_z=0$  sein muß.

Die Hauptspannungen  $\sigma_I$  und/oder  $\sigma_{II}$  sind in der Regel von Null verschieden, während  $\sigma_{III}$  nur dann von Null verschieden ist, wenn in die Oberfläche eine Last (z.B. in Folge eines Druckes) eingeleitet wird.

Für den statischen Festigkeitsnachweis gilt folgendes:

Für duktile Werkstoffe (Walz und Schmiedestahl, GS, Alu-Knetwerkstoff) können die Spannungen nach beiden Varianten ermittelt werden.

Für semiduktile und spröde Werkstoffe (GJS, GJM, GJL und Aluguß) mit unterschiedlicher Druck und Zugfestigkeit erfolgt der Nachweis immer ausgehend von den Hauptspannungen.



### 1.2.7.2. Geschweißte Bauteile (0.3.3.2)

Werden Schweißnähte berechnet, dann muß immer auch ein in der Oberfläche befindlicher Normaleneinheitsvektor senkrecht zur Nahtübergangskerbe angegeben werden.

Wird eine finite Element-System verwendet, dann können die Spannungskomponenten und der Normaleneinheitsvektor automatisch übernommen werden.

Wenn die Spannungen manuell eingegeben werden, sollte das Koordinatensystem im Nachweispunkt weist eine z-Achse senkrecht zur Oberfläche aufweisen und in das Bauteilinnere zeigen. Der Normaleneinheitsvektor muß dann in der x-y-Ebene liegen.

winLIFE 4.0 2018 verwendet das Strukturspannungskonzept, bei dem die extrapolierte Strukturspannung verwendet wird. Diese kann automatisiert aus dem FE-Modell bestimmt werden. Sie kann aber auch vom Benutzer eingegeben werden.

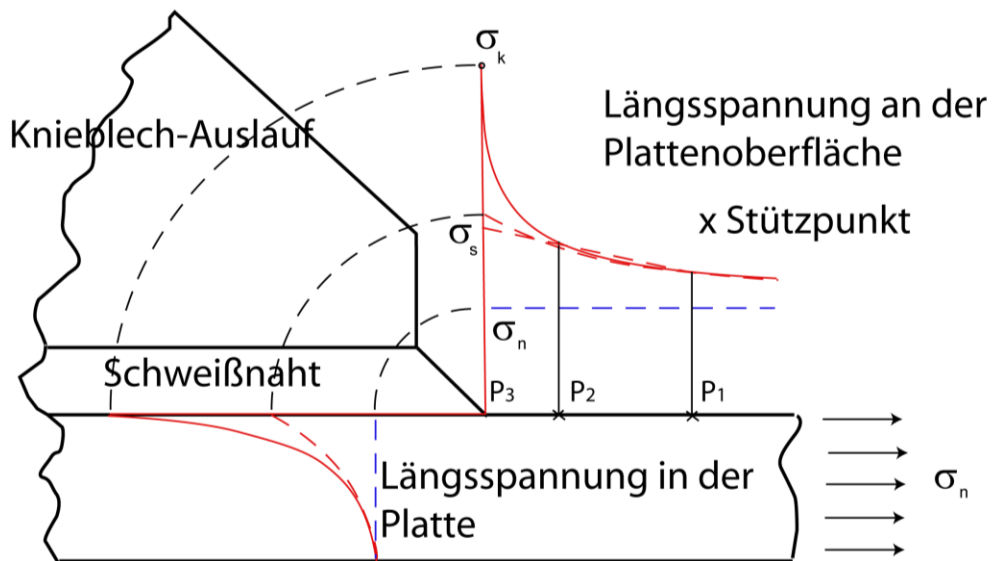


Bild 1: Methoden zur Extrapolation von Spannungen auf die Nahtübergangskerbe: P1, P2 Referenzpunkt, P3 Ort des extrapolierten Wertes.

Es werden die Spannungstensoren von 2 (P1, P2) oder drei Referenzpunkten auf die Nahtübergangskerbe extrapoliert (P3) und der erhaltene Spannungstensor mit dem Normaleneinheitsvektor senkrecht zur Nahtübergangskerbe multipliziert.

### 1.2.8. Einachsige und mehrachsige Spannungen (0.3.4)

Die am Nachweispunkt auftretenden Spannungen können aus der Überlagerung mehrerer Einzelbelastungen resultieren.

### **1.2.8.1. Statischer Nachweis**

Es ist vom Anwender die ungünstigste Kombination der Lasten zu wählen, so dass sich für den Nachweis nur ein einziger statischer Lastfall ergibt. Allerdings besteht die Notwendigkeit für den Benutzer, diesen ungünstigsten Lastfall für den Nachweis zu finden. Er wird daher möglicherweise mehrere Varianten untersuchen müssen.

### **1.2.8.2. Ermüdungsfestigkeitsnachweis**

Für den Nachweis (Dauer-, Zeit- und Betriebsfestigkeit) sind zeitlich veränderliche Spannungen zu betrachten. Dabei spielt die zeitliche Korrelation eine große Rolle. Wir unterscheiden:

- Proportionalen Spannungen
- Synchronen Spannungen
- Nicht proportionalen Spannungen

### **1.2.8.3. Proportionale Spannungen**

Die Hauptspannungsrichtung ändert sich nicht und die Hypothesen für die Vergleichsspannung sind anwendbar. Dabei sind Vorzeichen bei der Überlagerung zu beachten.

### **1.2.8.4. Synchrone Spannungen**

Bei synchronen Spannungen sind die Amplituden proportional, die Mittelspannung jedoch nicht. Da der Einfluß der Mittelspannung gegenüber der Amplitude gering ist, ist die Berechnung näherungsweise zulässig.

### **1.2.8.5. Nichtproportionale Spannungen**

Wenn sich die Hauptspannungsrichtung und/oder das Verhältnis der beiden Hauptspannungen ändert, kann eine Schädigungsrechnung nach der FKM-Richtlinie nicht durchgeführt werden.

Anwendbar ist dann das Verfahren der kritischen Schnittebene so wie es in winLIFE MULTIAXIAL implementiert ist. Dieser Weg setzt aber voraus, dass die Zeitverläufe der Belastung und die daraus resultierenden Spannungen bekannt sind.

---

## **1.3. Nachweis der Dauerfestigkeit für den nicht proportionalen Fall (NICHT in FKM geregelt)**

Der Nachweis für *nicht proportionale* Beanspruchungen mit örtlichen Spannungen wird in der FKM-Richtlinie ausgeschlossen und empfohlen, diesen Nachweis nach dem Verfahren der kritischen Schnittebene zu führen.

Es wird dazu eine schnittebenen-bezogene Worst Case Betrachtung durchgeführt, die in dem Quick-Check Modul für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis umgesetzt ist.

### 1.3.1. Berechnungsablauf (0.4)

Der

statische Nachweis

und der

Ermüdungsfestigkeitsnachweis (Dauerfestigkeits- und Zeitfestigkeitsnachweis)

für nicht geschweißte und geschweißte Bauteile unter proportionalen Beanspruchung erfolgt nach der FKM-Richtlinie mit Hilfe *örtlicher Spannungen*, die z.B. mit Hilfe der FEM erhalten wurden.

Das Vorgehen ist in den beiden folgenden Bildern dargestellt:

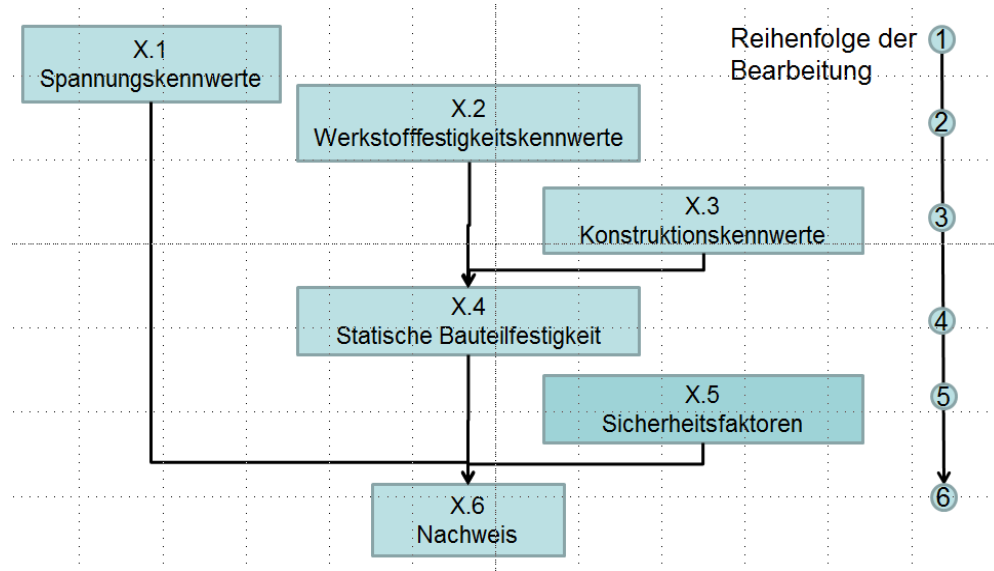


Bild 1-2: Ablaufschema für den statischen Nachweis nach FKM-Richtlinie

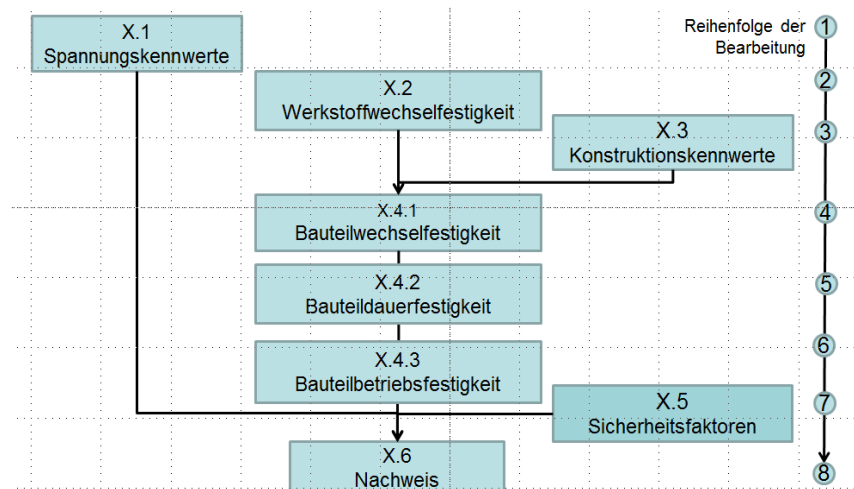


Bild 1-3: Ablaufschema für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie







# 2. Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach FKM (3)

---

## 2.1. Allgemeines (3.0)

### 2.1.1. Geschweißte Bauteile

Es sind der Grundwerkstoff (GW), Wärmeeinflußzone (WEZ) und Schweißnaht (SN) zu unterscheiden.

Die WEZ ist nur zu berücksichtigen bei verfestigten oder ausgehärteten Aluminium-Werkstoffen, die unter Temperatureinfluß eine Reduktion der Zugfestigkeit oder Fließgrenze aufweisen (Entfestigung). Es sind an einem Schweißnahtstoß die folgenden Nachweise zu führen:

#### 2.1.1.1. *Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe*

GW: Der Nachweis ist mit der Vergleichsspannung wie für ein nicht geschweißtes Bauteil durchzuführen.

SN: Der Nachweis ist mit der Vergleichsspannung in der Schweißnaht wie bei primärbeanspruchten Nähten durchzuführen. Nicht erforderlich ist der Nachweis in der Schweißnaht bei sekundärbeanspruchten Nähten (Kraftfluß nicht durch die Naht) sowie bei Schweißnähten, die nur durch eine Spannung parallel zur Naht beansprucht sind.

#### 2.1.1.2. *Entfestigende Aluminiumwerkstoffe*

WEZ (GW): Der Nachweis ist mit der Vergleichsspannung im GW/WEZ wie für ein nicht geschweißtes Bauteil durchzuführen. Grundwerkstoff und WEZ müssen einzeln nachgewiesen werden. Sind die Spannungen in der WEZ größer oder gleich der Spannungen als im GW, ist der Nachweis im der WEZ maßgebend.

SN: Der Nachweis ist mit der Vergleichsspannung in der Schweißnaht bei primärbeanspruchten Nähten durchzuführen.

Der Nachweis der Schweißnaht ist nicht erforderlich bei sekundärbeanspruchten Nähten (Kraftfluß nicht durch die Naht) sowie bei Schweißnähten, die durch eine Spannung parallel zur Naht beansprucht sind.

Die Ausdehnung der Schweißnaht kann durch deren Breite  $b_{wez}$  nach der folgenden Tabelle festgelegt werden.

---

## 2.2. Spannungskennwerte (3.1)

### 2.2.1. Allgemeines (3.1.0)

### 2.2.2. Nichtgeschweißte Bauteile (3.1.1)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.1.1 Seite 65

---

Der statische Nachweis wird in winLIFE FKM QUICKCHECK nur mit örtlichen Spannungen (an der Oberfläche) geführt, die (in der Regel) aus einer linear elastischen FE-Rechnung stammen. Der Benutzer kann die Spannungskomponenten (Spannungstensor) aber auch manuell eingeben.

Am kritischen Punkt der Bauteiloberfläche herrscht (unter der Voraussetzung, dass keine Kraft in die Oberfläche eingeleitet wird) ein ebener Spannungszustand, der durch

$$\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau = \tau_{xy} \quad (\text{Gleichung 3.1.1})$$

oder aber die 3 Hauptspannungen definiert ist.

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \quad (\text{Gleichung 3.1.2})$$

Die Hauptspannung  $\sigma_3$  ist in der Regel Null außer die Oberfläche ist belastet.

#### 2.2.2.1. Örtliche Vergleichsspannungen

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.1.1 Seite 65, 66

---

##### Duktile Werkstoffe

Für duktile Werkstoffe ( $f_t = 1/\sqrt{3}$ ) gilt die Gestaltänderungsenergiehypothese (GH).

Ebener Spannungszustand:

$$\sigma_v = \sigma_{GH} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_{xy} + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)} = \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)} \quad (\text{Gleichung 3.1.3})$$

Räumlicher Spannungszustand

$$\sigma_v = \sigma_{GH} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2))}$$
$$\sigma_v = \sigma_{GH} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad (\text{Gleichung 3.1.4})$$

---

Werden FEM-Daten verwendet, so wird aus dem Spannungstensor die Gestaltänderungsenergiehypothese GH berechnet.

---



## semiduktil oder spröde

Für semiduktile oder spröde Werkstoffe gilt:

$$\sigma_v = q * \sigma_{NH} + (1-q) * \sigma_{GH} \quad (\text{Gleichung 3.1.5})$$

$$q = \frac{\sqrt{3} - \frac{1}{f_t}}{\sqrt{3} - 1} \quad (\text{Gleichung 3.1.6})$$

q = Parameter für die Duktilität

f<sub>t</sub> = Schubfestigkeitsfaktor

Tabelle 3.1.1: Werte von q in Abhängigkeit verschiedener Werkstoffe und Schubfestigkeitsfaktor  $f_\tau$

	Stahl Al-Knet	GJS	GJM Alu-Guss	GJL
$f_\tau$	0,577	0,65	0,75	1
q	0	0,264	0,544	1

Besonderheit bei  $\sigma_{NH}$

- es wird die betragsmäßig größte Hauptspannung verwendet  
aus der Formel:

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_i / (f_{\sigma_i} * K_{NL,i}) \quad (\text{Gleichung 3.1.7})$$

f<sub>σ</sub> Druckfestigkeitsfaktor

K<sub>NL</sub> Graugussfaktor

I Index der Spannungskomponente

Ebener Spannungszustand

$$\sigma_{NH,q} = \frac{1}{2} [|\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2| + |\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2|] = \text{MAX}\{|\bar{\sigma}_1|; |\bar{\sigma}_2|\} \quad (\text{Gleichung 3.1.8})$$

$$\sigma_{GH,q} = \sqrt{(\bar{\sigma}_1^2 - \bar{\sigma}_1\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2^2)}$$

Dreiachsiger Spannungszustand

$$\sigma_{GH,q} = \text{MAX}\{|\bar{\sigma}_1|; |\bar{\sigma}_2|; |\bar{\sigma}_3|\} \quad (\text{Gleichung 3.1.9})$$

$$\sigma_v = \sigma_{GH} = \sqrt{\frac{1}{2}((\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_1)^2)}$$

Hinweis für duktiles Material:

$K_{NL}=1$  ;  $f_\sigma=1$  ;  $f_\tau=1$  ;  $q=0$

### Mehrachsigkeit

Mehrachsigkeitsgrad:

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_v} \quad (\text{Gleichung 3.1.10})$$

$\sigma_H$  hydrostatischer Spannungszustand

$\sigma_v = \sigma_{GH}$  Vergleichsspannungshypothese

Mit

$$\sigma_H = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (\text{Gleichung 3.1.11})$$

## 2.2.3. Geschweißte Bauteile (3.1.2)

### 2.2.3.1. Allgemeines (3.1.2.0)

Für die Berechnung der Schweißnähte werden Strukturspannungen verwendet. Die FKM-Richtlinie ist hier nicht sehr klar. Es wird von örtlichen Nennspannungen gesprochen. Dem Stand der Technik entsprechend (IIW-Richtlinie) werden hier Strukturspannungen verwendet. Dies ist im folgenden Kapitel beschrieben.

### 2.2.3.2. Nachweis mit Strukturspannungen (3.1.2.1)

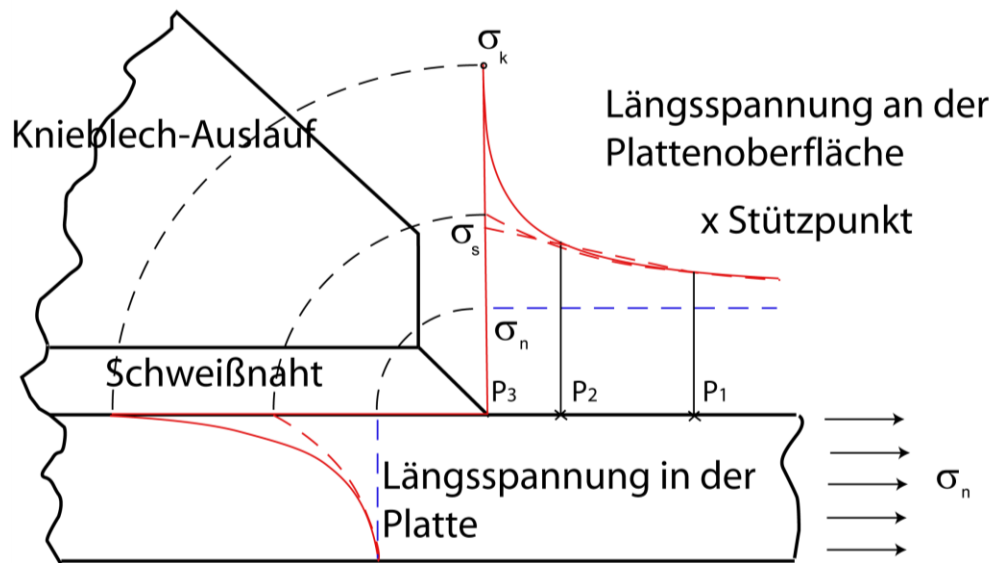


Bild 2-1: Definition der Spannungen zur Berechnung einer Schweißnaht ( $\sigma_s$  = Strukturspannung,  $\sigma_k$  = Kerbspannung,  $\sigma_n$  = Nennspannung)

Zur Ermittlung der Strukturspannungen werden Referenzpunkte (2 oder 3)  $P_1$  und  $P_2$  in einem von der Wanddicke abhängigen Abstand von der Schweißnaht existieren.

$$\vec{P}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} ; \vec{P}_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$$

In diesen Punkten müssen die Spannungstensoren

$\mathbf{S}_{P1,i}$  und  $\mathbf{S}_{P2,i}$  zu jedem Zeitpunkt  $i$  bekannt sein.

Das folgende Bild zeigt Punkt  $P_3$ , der in der Nahtübergangskerbe liegt. Für diesen Punkt soll die Lebensdauer vorhergesagt werden. Senkrecht zur Nahtübergangskerbe und in der Oberfläche im Abstand vom  $x$  und  $y$  fachen der Blechdicke (z.B.  $x=0,5 t$ ,  $y=1,5 t$  nach GL). liegen die Punkte  $P_2$  und  $P_1$ . Ein in der Oberfläche liegender Einheitsvektor  $n$  senkrecht zur Schweißnaht wird ebenfalls benötigt. (s. Bild unten)

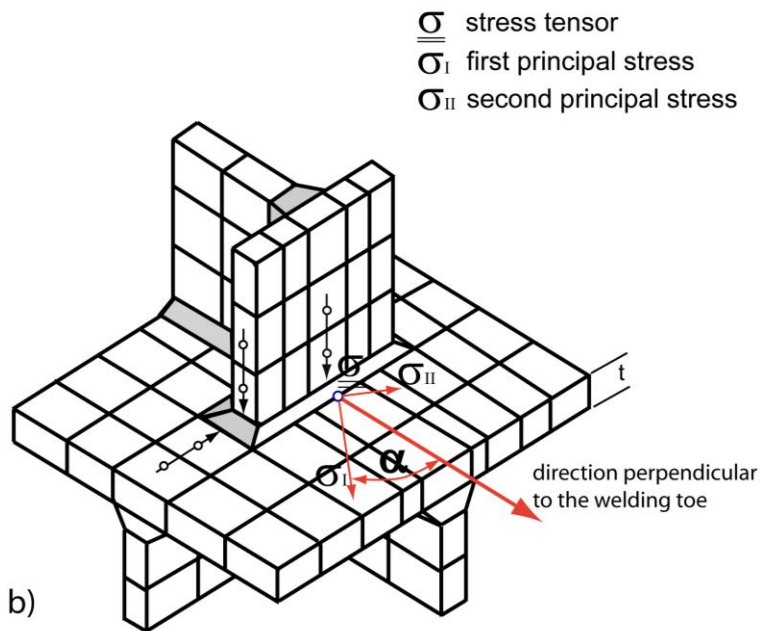


Bild 2-2: Schweißnaht einer Blechverbindung mit Hauptspannungen und Normaleneinheitsvektor in der Oberfläche.

Der Spannungstensor im Knoten  $k$ , der aus dem Einheitslastfall  $i$  resultiert, ist definiert als:

$$S_{ki,e} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Aus den Spannungstensoren der beiden Punkte  $P_1$  und  $P_2$  wird für Punkt  $P_3$  der Spannungstensor in der Schweißnahtübergangskerbe extrapoliert. Es existieren dabei zwei Möglichkeiten, die lineare Extrapolation und die quadratische.

Es werden dabei alle Komponenten des Spannungstensors nach folgenden Gleichungen extrapoliert:

Für den Fall der linearen Extrapolation und einem Abstand der Referenzpunkte von  $0,4 t$  und  $1,0 t$ :

$$S_s = 1,67 S_{0,4t} - 0,67 S_{1,0t}$$

Dieser Ansatz wird empfohlen wenn die Elementlänge am Hot-Spot nicht größer als  $0,4 t$  ist.

Ebenfalls für lineare Interpolation jedoch mit den Abständen  $0,5 t$  und  $1,5 t$  gilt:

$$S_s = 1,5 S_{0,5t} - 0,5 S_{1,5t}$$

Dieser Ansatz wird vom GL empfohlen.

Für den Fall der quadratischen Extrapolation und einem Abstand der Referenzpunkte von 0,4 t, 0,9 t und 1,4 t:

$$\mathbf{S}_s = 2,52 \mathbf{S}_{0,4t} - 2,24 \mathbf{S}_{0,9t} + 0,72 \mathbf{S}_{1,4t}$$

Dieser Ansatz wird empfohlen, wenn ein bedeutsamer nichtlinearer Spannungsanstieg am Hot-Spot erwartet wird.

Sollen andere Abstände verwendet werden, so kann dies durch Eingabe der Multiplikatoren in dem FEMAP-Postprozessor erfolgen.

Die Extrapolation erfolgt mit Hilfe des Pre-Prozessors (für FEMAP verfügbar). Es wird dann der Spannungstensor  $\mathbf{S}_s$  im Punkt  $P_3$  mit dem Richtungseinheitsvektor  $\vec{n}$  nach folgender Gleichung multipliziert:

$$\vec{s}_{ki} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} * \vec{n} = \begin{pmatrix} s_\varphi \\ \tau_{\varphi 1} \\ \tau_{\varphi 2} \end{pmatrix}$$

$\vec{s}_{ki}$  stellt den in Normalenrichtung projizierten Vektor dar. Die Normalspannungskomponente erhält man als Ergebnis folgenden Skalarproduktes:

$$s_\varphi = \vec{s}_{ki} * \vec{n} \quad \text{(Entspricht } \sigma, \text{ nach Terminologie der FKM Richtlinie)}$$

Die resultierende, gesamte Schubspannung kann dann mit Hilfe des Pythagoras nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\tau_\varphi = \sqrt{|\vec{s}_{ki}|^2 - s_\varphi^2} \quad \text{(Entspricht } \tau, \text{ nach Terminologie der FKM Richtlinie)}$$

Die Schadensakkumulationsrechnung erfolgt unabhängig voneinander unter Verwendung der Schubspannungen und Normalspannungen. Anschließend können die beiden Schadensanteile gewichtet addiert werden. Die Gewichtungsfaktoren sind je nach Regelwerk unterschiedlich und es empfiehlt sich eine Absprache mit dem Zertifizierer.

Dieses Vorgehen wird für den Fall als geeignet angesehen, wenn die größte Hauptspannung einen Winkel kleiner als +- 45 Grad zum Normaleneinheitsvektor einschließt. Um zu entscheiden, ob diese Bedingung erfüllt ist, wird dieser Winkel für jeden Zeitschritt in einem Diagramm dargestellt. Der Benutzer kann dann an Hand der Grafik entscheiden, ob diese Bedingung erfüllt ist oder nicht.

## GW und WEZ

Im Blech herrscht näherungsweise ein ebener Spannungszustand. Aus den einzelnen Komponenten der Spannung ist wie für ein nichtgeschweißtes Bauteil eine Vergleichsspannung zu berechnen.

Für duktile Werkstoffe gilt die Gestaltänderungsenergiehypothese. Für schweißbaren Grundwerkstoff die gemischte Festigkeitshypothese. Die Berechnung erfolgt über die Hauptspannungen.

## Schweißnaht SN

Es sind die Spannungskomponenten

$\sigma_{||}$   
 $\sigma_{\perp}$   
 $\tau_{\perp}$

bezogen auf die Naht zu bestimmen. Dies erfolgt mit Hilfe der Strukturspannungen, deren Berechnungsmethode in Kapitel XYZ definiert sind. Werden die Spannungen vom Benutzer manuell eingegeben, so muß er neben den Spannungswerten auch den Normaleneinheitsvektor angeben. Dieser wird in der Regel 1,0,0 betragen. Aus ,Gründen der Datenkompatibilität wird er aber benötigt.

Für den statischen Festigkeitsnachweis wird  $\sigma_{||}$  nicht verwendet. Die in Kehlnähten auftretenden Schubspannungen  $\tau_{\perp}$  können auch als Normalspannungen  $\sigma_{\perp}$  angesehen werden. Im Folgenden wird mit  $\sigma_{\perp}$  gerechnet.

Für nicht querschnittsdeckende Schweißnähte ( $a < t$ , Kehlnaht, Y-Naht) oder für exzentrische SN sind die Spannungen nach dem Verhältnis von Blechdicke zu Nahtdicke bzw. dem Einfluß der Exzentrizität zu erhöhen.

Aus den einzelnen Spannungskomponenten ist ein Vergleichsspannungswert entsprechend der empirischen Festigkeitshypothese nach DIN18800 zu berechnen.

$$\sigma_{vw} = \sqrt{|\sigma_{\perp}|^2 + |\tau_{\perp}|^2}$$

### 2.2.3.3. Nachweis mit Kerbspannungen (3.1.2.2)

Die Anwendung von Kerbspannungen ist im statischen Festigkeitsnachweis auf Baustähle beschränkt. Es wird die Schweißnaht detailliert entsprechend dem Konzept von Radaj mit einem Radius der Nahtübergangskerbe von 1mm modelliert [19]. Ein ausreichend feines Netz ist zu verwenden.

Am Nachweispunkt wird die Vergleichsspannung nach von Mises verwendet. Weiterhin ist der Mehrachsigsigkeitsgrad

$$h_{wk} = \frac{\sigma_{HWK}}{\sigma_{vWK}}$$

Mit der hydrostatischen Spannung

$$\sigma_{HWK} = (\sigma_{1,WK} + \sigma_{2,WK}) * 0,3333$$

zu ermitteln. Beim Nachweis mit dem Kerbspannungskonzept entfällt die Unterteilung in Grundwerkstoff und Schweißnaht.

---

## 2.3. Werkstoffkennwerte (3.2)

### 2.3.1. Allgemeines (3.2.0)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.2.1.0 Seite 68

---

Werkstoffprobe ist eine nichtgekerbte, polierte Rundprobe des Durchmessers

$$d_0 = 7.5\text{mm.}$$

Normwerte entsprechen einer mittleren Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} = 97.5\%$  und sind abhängig vom effektiven Durchmesser  $d_{\text{eff}}$ . Bauteilwerte gelten für den effektiven Durchmesser  $d_{\text{eff}}$ , können aber eine andere Überlebenswahrscheinlichkeit haben.

Bauteil-Normwerte gelten für den effektiven Durchmesser  $d_{\text{eff}}$  für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97.5%.

### 2.3.2. Nichtgeschweißte Bauteile (3.2.1)

#### 2.3.2.1. Allgemeines (3.2.1.0)

Alle Werkstoff-Festigkeitswerte gelten für eine nichtgekerbte, polierte Rundprobe des Durchmessers

$$d_0 = 7.5\text{mm.}$$

Es sind Halbzeug-Normwerte und ( $d_{\text{eff},N}$ ) und Bauteilnormwerte ( $d_{\text{eff}}$ ) zu unterscheiden. Bauteilwerte können Norm-, Zeichnungs- oder Istwerte sein.

Man kann jedoch die individuellen Eigenschaften eines Bauteils berücksichtigen und aus den Halbzeug-Normwerten die Bauteilnormwerte wie im folgenden Kapitel gezeigt berechnen.

#### 2.3.2.2. Halbzeug-Normwerte (3.2.1.1)

Halbzeug- bzw. Probenstücknormwerte ( $R_{m,N}, R_{p,N}$ ) gelten für en effektiven Durchmesser  $d_{\text{eff},N}$  und haben die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{U}}=97,5\%$

$R_{m,N}$  ist der Mindestwert oder der gewährleistete Wert oder die untere Grenze des Von-bis-Bereiches für das kleinste Halbzeug (Knetwerkstoff) bzw. für das Probenstück (Guß Werkstoff) nach Werkstoffnorm.

$R_{p,N}$  ist der Mindestwert oder der gewährleistete Wert für das kleinste Halbzeug bzw. für das Probenstück nach Werkstoffnorm.

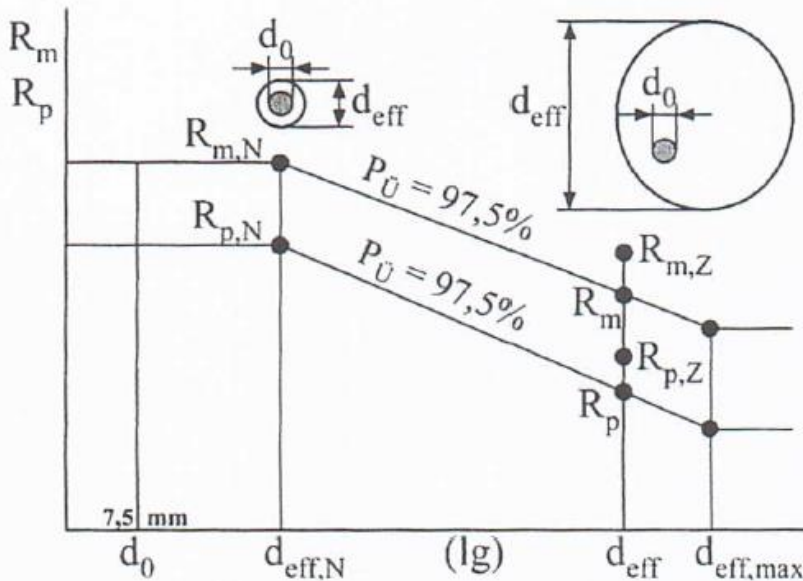


Bild 2-3: Normwerte, Bauteilwerte und Bauteilnormwerte (s. FKM Richtlinie Kap. 3.2.1.2 Seite 68)

### 2.3.2.3. Bauteilnormwerte (3.2.1.2)

Die Bauteilnormwerte  $R_m$ ,  $R_p$  gelten für den effektiven Bauteildurchmesser  $d_{eff}$  und die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{U}}=97,5\%$  für die Gesamtheit aller Bauteile.

Mit  $R_m$  und  $R_p$  kann ein für die Gesamtheit aller Bauteile gültiger (nicht auf ein spezielles Bauteil beschränkter) Festigkeitsnachweis geführt werden.

Die Bauteilnormwerte  $R_m$ ,  $R_p$  können aus dem Halbzeug-Normwerten  $R_{m,N}$ ,  $R_{p,N}$  oder aus den Bauteilzeichnungswerten  $R_{m,Z}$ ,  $R_{p,Z}$  berechnet werden

Die Berechnung der Bauteilnormwerte aus dem Halbzeug-Normwert, dem Anisotropiefaktor und dem technologischen Größenfaktor wird in dem folgenden Kapitel beschrieben und gilt für das individuelle Bauteil.

### Bauteilnormwerte aus Halbzeugnormwerten

Bauteilnormwert der Zugfestigkeit  $R_m$

$$R_m = K_{d,m} * K_A * R_{m,N}$$

Bauteilnormwert der Fließgrenze  $R_p$ :

$$R_p = K_{d,p} * K_A * R_{p,N}$$

$R_m, R_p$  Bauteilnormwert der Zugfestigkeit und Fließgrenze

$K_{d,m}, K_{d,p}$  technologischer Größenfaktor



$K_A$	Anisotropiefaktor
$R_{m,N}, R_{p,N}$	Halbzeug- bzw. Probennormwert

### Bauteil-Normwert aus Bauteil-Zeichungswerten

Nicht behandelt

### Bauteil-Istwerte

Nicht behandelt

### 2.3.2.4. Technologischer Größenfaktor (3.2.1.4)

Mit dem technologischen Größenfaktor wird die meist abnehmende Werkstoff-Festigkeit mit wachsender Größe berücksichtigt.

### Stahl – und Eisenguß Werkstoff

GJL

$$d_{eff} \leq 7.5mm \rightsquigarrow K_{d,m} = 1.207$$

$$d_{eff} > 7.5mm \rightsquigarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 1.207 \left( \frac{d_{eff}}{7.5mm} \right)^{-0.1922}$$

Nichtrostender Stahl:

$$K_{d,m} = K_{d,p} = 1$$

Für alle anderen Stahl- und Eisenguß Werkstoffe

$$d_{eff} \leq d_{eff,N,m} \rightsquigarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 1$$

$$d_{eff,N,m} < d_{eff} < d_{eff,max,m} \rightsquigarrow K_{d,m} = \frac{1 - 0.7686 a_{d,m} \log_{10}\left(\frac{d_{eff}}{7.5}\right)}{1 - 0.7686 a_{d,m} \log_{10}\left(\frac{d_{eff,N,m}}{7.5}\right)}$$

Für Walzstahl ist  $d_{eff,max} = 250$ , für alle anderen innerhalb der Werkstoffnorm

## Aluminiumwerkstoff

Aluminiumknetwerkstoff

$$K_{d,m} = K_{d,p} = 1$$

Aluminiumgusswerkstoff:

$$d_{eff} \leq d_{eff,N,m} = d_{eff,N,p} = 12mm \rightsquigarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 1$$

$$12mm < d_{eff} < d_{eff,max,m} = d_{eff,max,p} = 150mm \rightsquigarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 1.1 \left( \frac{d_{eff}}{7.5mm} \right)^{-0.2}$$

$$d_{eff} \geq d_{eff,max,m} = d_{eff,max,p} = 150mm \rightsquigarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 0.6$$

## Bestimmung des effektiven Durchmessers $d_{eff}$

### Fall 1

gilt für Bauteile, auch Schmiedeteile, aus vergütetem Vergütungsstahl,

einsatzgehärtetem Einsatzstahl und nitriertem Nitrierstahl, aus Vergütungsstahlguss, GGG, GT und GG.

Allgemein gilt:

$$d_{eff} = 4 \cdot \sqrt[3]{V/O}$$

mit dem Volumen V und der Oberfläche O des betrachteten Bauteilausschnitts

### Fall 2

gilt für Bauteile, auch Schmiedeteile, aus unlegiertem Baustahl, aus

Feinkornbaustahl, aus normalgeglühtem Vergütungsstahl, aus allgemeinem

Stahlguss und aus Aluminiumwerkstoff. Der effektive Durchmesser  $d_{eff}$  ist

gleich dem Durchmesser oder der Wanddicke des Bauteils.

Werkstoffgruppe <sup>↖1</sup>	$d_{eff,N,m}$	$a_{d,m}$
	$d_{eff,N,p}$ in mm	$a_{d,p}$ ↖2
unlegierter Baustahl DIN-EN 10 025	40	0,15
Feinkornbaustahl DIN 17 102	40	0,3
Feinkornbaustahl DIN EN 10 113	70	0,2
Feinkornbaustahl DIN EN 10 113	40	0,3
Feinkornbaustahl DIN EN 10 113	100	0,25
Vergütungsstahl, vergütet DIN EN 10 083-1	30	0,3
Vergütungsstahl, vergütet DIN EN 10 083-1	16 <sup>↖3</sup>	0,3
Vergütungsstahl, normalgeglüht DIN EN 10 083-1	16	0,4
Vergütungsstahl, normalgeglüht DIN EN 10 083-1	16	0,1
Vergütungsstahl, normalgeglüht DIN EN 10 083-1	16	0,2
Einsatzstahl, blindgehärtet DIN EN 10 084	16	0,5
Einsatzstahl, blindgehärtet DIN EN 10 084	16	0,5
Nitrierstahl, vergütet DIN EN 10 085	40	0,25
Nitrierstahl, vergütet DIN EN 10 085	40	0,30
nichtrostender Stahl DIN EN 10 088-2 <sup>↖4</sup>	-	-
Stahl für größere Schmiedestücke, vergütet, SEW 550 <sup>↖5</sup>	250	0,2
Stahl für größere Schmiedestücke, vergütet, SEW 550 <sup>↖5</sup>	250	0,25
Stahl für größere Schmiedestücke, normalgeglüht, SEW 550	250	0
Stahl für größere Schmiedestücke, normalgeglüht, SEW 550	250	0,15

Werkstoffgruppe	$d_{eff,N,m}$	$a_{d,m}$
	$d_{eff,N,p}$ in mm	$a_{d,p}$
Stahlguss DIN 1681	100	0,15
Stahlguss DIN 1681	100	0,3
Vergütungsstahlguss, luftvergütet, DIN 17 205	300 <sup>↖1</sup>	0,15
Vergütungsstahlguss, luftvergütet, DIN 17 205	300	0,3
Vergütungsstahlguss, flüssigkeitsvergütet, DIN 17 205	100	0,3
Vergütungsstahlguss, flüssigkeitsvergütet, DIN 17 205	100	0,3
Sorten <sup>↖2</sup> Nr. 1, 3, 4	100	0,3
desgl. Sorte Nr. 2 <sup>↖3</sup>	200	0,15
desgl. Sorte Nr. 2 <sup>↖3</sup>	200	0,3
desgl. Sorten Nr. 5, 6, 8	200	0,15
desgl. Sorten Nr. 5, 6, 8	200	0,3
desgl. Sorten Nr. 7, 9	200	0,15
desgl. Sorten Nr. 7, 9	200	0,3
desgl. Sorten Nr. 7, 9	500	0,15
desgl. Sorten Nr. 7, 9	500	0,3
GGG DIN EN 1563	60	0,15
GGG DIN EN 1563	60	0,15
GT <sup>↖4</sup>	15	0,15
GT <sup>↖4</sup>	15	0,15




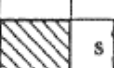
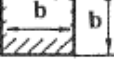
Nr.	Querschnittsform	$d_{eff}$	$d_{eff}$
		Fall 1	Fall 2
1		d	d
2		2s	s
3		2s	s
4		$\frac{2b \cdot s}{b + s}$	s
5		b	b

Bild 2-4: Effektiver Durchmesser (nach FKM S. 68)

### 2.3.2.5. Anisotropiefaktor (3.2.1.5)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.2.1.5 Seite 71

---

Der Anisotropiefaktor berücksichtigt, dass für gewalzte und geschmiedete Bauteile die Werkstofffestigkeit quer zur bevorzugten Richtung der Bearbeitung geringer als in der bevorzugten Richtung der Bearbeitung (Walzrichtung).

Eisen- und Aluminiumgusswerkstoffe

Mehrachsige Spannungen und Schubspannungen

Längs zur bevorzugten Bearbeitungsrichtung

$$K_A = 1$$

Stahl

$R_m$ in MPa	bis 600	über 600 bis 900	über 900 bis 1200	über 1200
$K_A$	0.90	0.86	0.83	0.80

Aluminiumknetwerkstoff

$R_m$ in MPa	bis 200	über 200 bis 400	über 400 bis 600
$K_A$	1	0.95	0.9

Bild 2-5: Tabelle 1.2.4 entnommen aus der FKM-Richtlinie Kap. 3.2.15 Seite 71

### 2.3.2.6. Druck und Schubfestigkeitsfaktor (3.2.1.6)

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.2.1.6 Seite 71

Der **Druckfestigkeitsfaktor** berücksichtigt, dass für Druckspannungen ( $R_{c,m}$ ,  $R_{c,p}$ ) im allgemeinen eine höhere Werkstofffestigkeit

$$R_{c,m} = f_{\sigma} R_m$$

$$R_{c,p} = f_{\sigma} R_p$$

Für **Schubspannungen** sind die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Fließgrenze  $R_p$  durch die Schubfestigkeit  $R_{s,m}$  und die Schubfließgrenze  $R_{s,p}$  zu ersetzen.

$$R_{s,m} = f_{\tau} R_m$$

$$R_{s,p} = f_{\tau} R_p$$

Werkstoffgruppe	$f_{\sigma}$	$f_{\sigma}$	$f_{\tau}$
	für Zug	für Druck	
Einsatzstahl	1	1	0,577
nichtrostender Stahl	1	1	0,577
Schmiedestahl	1	1	0,577
Stahl außer diesen	1	1	0,577
GS	1	1	0,577
GJS	1	1,3	0,577
GJM	1	1,5	0,577
GJL	1	2,5	0,65
Alu-Knetwerkstoff	1	1	0,75
Alu-Gusswerkstoff	1	1,5	1

Bild 2-6: Tabelle 1.2.5 entnommen aus der FKM-Richtlinie

### 2.3.2.7. *Temperaturfaktor (3.2.1.7)*

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.2.1.7 Seite 71

---

**Normale Temperaturen:  $K_{T,m} = 1$**

Werkstoff	ab °C	bis °C
Feinkornbaustahl	-40	60
Anderer Stahl	-40	100
Eisengusswerkstoff	-25	100
ausgehärteter Aluminiumwerkstoff	-25	50
nicht Ausgehärteter Aluminiumwerkstoff	-25	100

Bild 2-7: Tabelle entnommen aus der FKM-Richtlinie

**Niedere Temperaturen liegen außerhalb des Anwendungsbereichs**

## Temperaturfaktor, Kurzzeitwerte

Höhere Temperaturen: Bei Stahl und Eisenguß Werkstoffe bis 500 °C  
bei Aluminiumwerkstoffe bis 200 °C

Aluminiumwerkstoffe:  $K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - a_{T,D} * 10^{-3} * (T_{[°C]} - 50)$

Feinkornbaustahl:  $K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,2 * 10^{-3} * T_{[°C]}$

GJL  $K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 2,4 * 10^{-3} * (T_{[°C]})$

Anderer Stahl außer nichtrostender Stahl  $K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,7 * 10^{-3} * (T_{[°C]} - 100)$

GS  $K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,5 * 10^{-3} * (T_{[°C]} - 100)$

Aushärtbarer Aluminiumwerkstoff  $K_{T,m} = K_{T,p} = \text{MAX}(1 - 4,5 * 10^{-3} * (T_{[°C]} - 50); 0,1)$

Nichtaushärtbarer Aluminiumwerkstoff  $K_{T,m} = K_{T,p} = \text{MAX}(1 - 4,5 * 10^{-3} * (T_{[°C]} - 100); 0,1)$

## Temperaturfaktor, Langzeitwerte

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.2.1.7 Seite 73

Höhere Temperaturen:	Bei Stahl und Eisenguß Werkstoffe bis 500 °C
$K_{Tl,p} = 10^{(a_{Tl,p} + b_{Tl,p} * P_p + c_{Tl,p} * P_p^2)}$	$K_{Tl,m} = 10^{(a_{Tl,m} + b_{Tl,m} * P_m + c_{Tl,m} * P_m^2)}$

$$P_m = 10^4 \cdot (T / ^\circ C + 273) \cdot [C_m + \lg(t / h)]$$

$$P_p = 10^4 \cdot (T / ^\circ C + 273) \cdot [C_p + \lg(t / h)]$$

$a_{Tl,m}, \dots, C_p$  Konstanten laut Tabelle

T = Temperatur in °C

T = Betriebsdauer [h] bei T

Stahl <sup>◊2</sup>	Unlegierter Baustahl <sup>◊3</sup>	Feinkornbaustahl <sup>◊4</sup>	Vergütungsstahl <sup>◊5</sup>
Zeitstandfestigkeit			
$a_{Tl,m}$	- 0,994	- 1,127	- 3,001
$b_{Tl,m}$	2,485	2,485	3,987
$c_{Tl,m}$	- 1,260	- 1,260	- 1,423
$C_m$	20	20	24,27
Zeitdehngrenze			
$a_{Tl,p}$	- 5,019	- 6,352	- 3,252
$b_{Tl,p}$	7,227	9,305	5,942
$c_{Tl,p}$	- 2,636	- 3,456	- 2,728
$C_p$	20	20	17,71

Eisengusswerkstoff	GS <sup>◊6</sup>	GJS <sup>◊7</sup>	
Zeitstandfestigkeit			
$a_{Tl,m}$	- 7,524	2,50	
$b_{Tl,m}$	9,894	- 1,83	
$c_{Tl,m}$	- 3,417	0	
$C_m$	19,57	20	
Zeitdehngrenze			
$a_{Tl,p}$	- 10,582	0,12	
$b_{Tl,p}$	8,127	1,52	
$c_{Tl,p}$	- 1,607	- 1,28	
$C_p$	35,76	18	

Bild 2-8: Tabelle 1.2.5 entnommen aus der FKM-Richtlinie



## Temperaturfaktor, Langzeitwerte

Höhere Temperaturen: Bei Aluminiumwerkstoffen bis 200 °C

$K_{T,m}$  abzulesen aus Bild 1.2.4, entnommen aus der FKM –Richtlinie

$K_{T,p}$  ist bisher noch nicht festgelegt, es kann aber angenommen werden, dass der Quotient  $R_{p,T}/j_{pt} == R_{m,T}/j_{mt}$

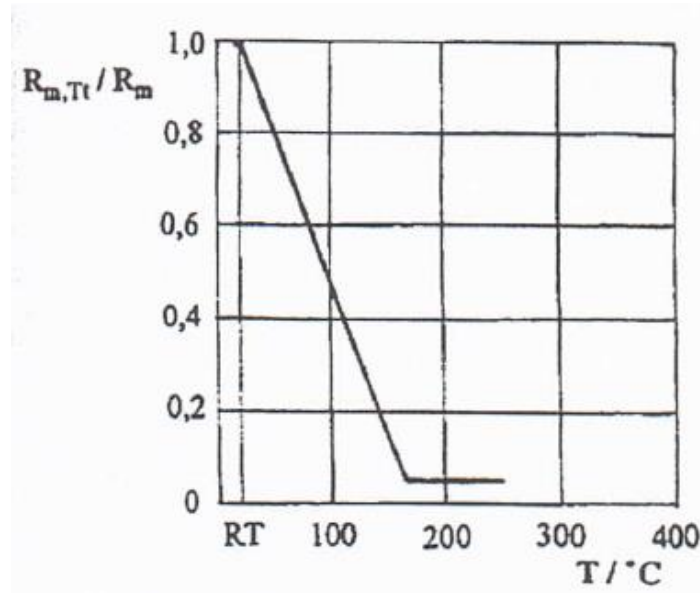


Bild 2-9: (Bild 1.2.4 aus FKM Seite 74)

## 2.3.3. Geschweißte Bauteile (3.2.2)

### 2.3.3.1. Allgemeines (3.2.2.0)

Alle Werkstoff-Festigkeitswerte gelten für die in den Werkstofftabellen für den Grundwerkstoff GW angegebenen Abmessungen. Technologischer Größenfaktor  $K_d$  und Anisotropiefaktor  $K_A$  entfallen für geschweißte Bauteile. Für Werkstoffgruppen wie bedingt schweißbarer und nichtrostender Stahl, für Eisen- und Aluminiumguss gilt die Berechnung als vorläufig und ist mit Vorsicht anzuwenden.

### 2.3.3.2. Statische Festigkeitswerte für Walzstahl und Stahlguss (3.2.2.1)

Zugfestigkeit  $R_m$  und Streckgrenze  $R_e$  für den Grundwerkstoff in geschweißten Bauteilen aus Walzstahl und Stahlguss je nach Erzeugnisdicke nach DIN 18800 siehe Tabelle 5.1.24

### 2.3.3.3. Statische Festigkeitswerte für Aluminium (3.2.2.2)

Statische Werte wie  $R_m$ , 0,2-Dehngrenze  $R_{p,0,2}$  für den Grundwerkstoff GW in geschweißten Bauteilen aus Aluminium je nach Halbzeug und Werkstoffzustand nach DIN4113 siehe Tabelle 5.1.25

### 2.3.3.4. **Druck- und Schubfestigkeitsfaktor (3.2.2.3)**

Druckfestigkeitsfaktor  $f_{\sigma}$  nach folgender Tabelle (nach FKM 3.2.5)

Werkstoffgruppe	$f_{\sigma}$ für Zug	$f_{\sigma}$ für Druck	$f_{\tau}$
Einsatzstahl	1	1	0,577
nichtrostender Stahl	1	1	0,577
Schmiedestahl	1	1	0,577
Stahl außer diesen	1	1	0,577
GS	1	1	0,577
GJS	1	1,3	0,65
GJM	1	1,5	0,75
GJL	1	2,5	1
Alu-Knetwerkstoff	1	1	0,577
Alu-Gusswerkstoff	1	1,5	0,75

Bild 10: Druckfestigkeitsfaktor  $f_{\sigma}$  aus FKM-Richtlinie Tabelle 3.2.5 und Schubfestigkeitsfaktor  $f_{\tau}$  für die WEZ und GW wird nach folgender Tabelle gewählt.

Werkstoff	$f_{\tau}$
Stahl, GW	0,577
Aluminium, GW, WEZ	0,577

Bild 11: Schubfestigkeitsfaktor  $f_{\tau}$  aus FKM-Richtlinie Tabelle 3.2.8

### 2.3.3.5. **Temperaturfaktoren(3.2.2.4)**

Wie nicht geschweißte Werkstoffe.

### 2.3.3.6. **Entfestigungsfaktor (3.2.2.5)**

Bei geschweißten Bauteilen aus Aluminium kann es zu einer Entfestigung durch den Schweißvorgang kommen. Dies wird durch den Entfestigungsfaktor berücksichtigt

$$\rho_{WEZ} \leq 1$$

Werte sind der Tabelle 5.1.25 aus der FKM Richtlinie zu entnehmen.

---

## 2.4. Konstruktionskennwerte (3.3)

### 2.4.1. Allgemeines (3.3.0)

Es sind die Konstruktionskennwerte für nicht geschweißte und geschweißte Bauteile getrennt zu berechnen. Es sind dabei zu unterscheiden.

- $n_{pl}$      Plastische Stützzahl. Tragreserven nach Überschreiten der Streckgrenze werden erfasst.  
 $K_{NL}$      Graugussfaktor zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verhaltens unter Zug und Druck.  
 $\alpha_w$      Schweißnahtfaktor, der im GW und WEZ die Abminderung der Festigkeit der Schweißnaht erfasst.

### 2.4.2. Nicht geschweißte Bauteile (3.3.1)

#### 2.4.2.1.     *plastische Stützzahl (3.3.1.1)*

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.3 Seite 75

---

Mit den Konstruktionskennwerten werden die plastischen Reserven des Werkstoffs berücksichtigt ->  $n_{pl}$

$K_{NL}$  Graugussfaktor zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Zug-Druckverhalten von GJL

Austenitischer Stahl im losgeglühten Zustand

$$n_{pl,x} = K_p$$

Alle übrigen Werkstoffe

$$n_{pl,x} = \text{MIN} ( \text{sqrt}(E * \epsilon_{ertr} / R_p); K_p )$$

$\epsilon_{ertr}$  = ertragbare Gesamtdehnung

E = Elastizitätsmodul

$R_p$  = Fließgrenze

$K_p$  = plastische Formzahl

$\epsilon_{ertr}$  = ertragbare Gesamtdehnung

$$h \leq 1/3 \quad \epsilon_{ertr} = \epsilon_{ref} \quad = A, \text{ für duktile Werkstoffe } ( f_t = 0,577 ) \\ = 0,4 * A, \text{ für semiduktile und spröde Werkstoffe}$$

$$h > 1/3 \quad \epsilon_{ertr} = \epsilon_0 + 0,3 ((\epsilon_{ref} - \epsilon_0) / 0,3)^{3-h}$$

$\varepsilon_0$  = minimal ertragbare Gesamtdehnung

Tabelle 3.3.1 entnommen  
aus FKM-Richtlinie

Mechanische Randschichtverfestigung

wird nicht berücksichtigt

Randschichthärtung mit  $\varepsilon_{ref} = 1 \%$

Werkstoff- gruppe	$10^{-5} \cdot E$ [MPa]	$\varepsilon_0$ [%]	
		$A \geq 6\%$	$A < 6\%$
Stahl, GS	2,1	5	
GJS	1,7	4	R <sub>p</sub> / E
GJM	1,8	2	
GJL	1,0	–	
Alu-Knet	0,7	5	
Alu-Guss	0,7	2	

Bild 2-12: (Tabelle 3.3.1 aus FKM)

$K_p$  = Plastische Formzahl = vollplastische Traglast / elastische Grenzlast

Bei konstanten Spannungen im Querschnitt gilt  $K_p = 1$

Sonderfall Guss =  $K_p = 2 \cdot f_\sigma / (1 + f_\sigma)$

Falls die vollplastische Traglast und die elastische Grenzlast nicht bekannt sind, kann  $K_p$  aus der Formzahl abgeschätzt werden

$$K_p = K_{t,zd}; K_{t,s}; K_{p,b} * K_{t,b}; K_{p,t} * K_{t,t}$$

Diese sind in der Regel konservativer, weil die Fließbedingung infolge der Mehrachsigkeit nicht erfasst wurde

Mechanische Randschichtverfestigung wird nicht berücksichtigt

Randschichthärtung mit  $\varepsilon_{ref} = 1 \%$

## 2.4.3. Geschweißte Bauteile (3.3.2)

### 2.4.3.1. Plastische Stützzahl (3.3.2.1)

Die Berücksichtigung der plastischen Stützzahl bewirkt eine Verbesserung der Lebensdauer. Wird die plastische Stützzahl nicht berücksichtigt, so liegt das Ergebnis auf der sicheren Seite.

Die plastische Stützzahl darf nur berücksichtigt werden bei

- durchgeschweißten Nähten
- beidseitig nicht durchgeschweißten Nähten aber querschnittsüberdeckenden Nähten (z.B. Doppelkehlnaht)

Die plastischen Stützzahlen sind gleich für GW, WEZ und SN. Da die plastischen Stützzahlen nur bei querschnittsbedeckenden Nähten angewendet werden dürfen, können sie mit den Abmessungen des Querschnitts berechnet werden.

Für nichtduktilen Werkstoffe mit  $A < 6\%$  sind plastische Stützzahlen nicht anzuwenden, so das gilt

$$n_{pl} = 1$$

Für duktile Werkstoffe ( $A \geq 6\%$ ) sind die plastischen Stützzahlen wie folgt zu berechnen:

## Nachweis mit Strukturspannungen:

Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe

$$n_{pl,x} = \text{MIN} (\text{sqrt}(E * \epsilon_{\text{ertr}} / R_p); K_p)$$

entfestigende Aluminiumwerkstoffe.

$$n_{pl,x} = \text{MIN} (\text{sqrt}(E * \epsilon_{\text{ertr}} / (\rho_{\text{WEZ}} * R_p)); K_p)$$

$\epsilon_{\text{ertr}}$  = ertragbare Gesamtdehnung

E = Elastizitätsmodul

$R_p$  = Fließgrenze

$\rho_{\text{WEZ}}$  = Entfestigungsfaktor

$K_p$  = plastische Formzahl

Werkstoffgruppe	Stahl, GS	GJS	GJM	Alu-Knet	Alu-Guss
E [MPa]	210000	170000	180000	70000	70000
$\epsilon_{\text{ertr}}$ [%]	5	4	2	5	2

Bild 13: E-Modul und ertragbare Dehnung nach FKM Tabelle 3.3.3

## Nachweis mit Kerbspannungen

Die Anwendung von Kerbspannungen im statischen Festigkeitsnachweis ist nur für Baustähle möglich.

$$n_{pl,wK} = \text{MIN} (\text{sqrt}(E * \epsilon_{\text{ertr}} / R_p); K_p)$$

$\epsilon_{\text{ertr}}$  = ertragbare Gesamtdehnung

E = Elastizitätsmodul

$R_p$  = Fließgrenze

$\rho_{\text{WEZ}}$  = Entfestigungsfaktor

$K_p$  = plastische Formzahl

Die ertragbare Dehnung ist abhängig von der Mehrachsigkeit

Für  $h_{wK} < 1/3$  gilt:

$$\epsilon_{ertr,wK} = \epsilon_{ref,wK}$$

für  $h_{wK} > 1/3$  gilt:

$$\epsilon_{ertr,wK} = \epsilon_{0,wK} + 0,3 * \left( \frac{\epsilon_{ref,wK} - \epsilon_{0,wK}}{0,3} \right)^{3 h_{wK}}$$

$\epsilon_{0,wK}$  Minimum der ertragbaren Dehnung bei hoher Mehrachsigkeit

$\epsilon_{ref,wK}$  Referenzpunkt=ertragbare Dehnung bei einachsigem Spannungszustand

$h_{wK}$  Mehrachsigkeitsgrad

Festigkeitsbereich	$\epsilon_{0,wK}$	$\epsilon_{ref,wK}$
$R_{p02} < 460$ MPa	0,05	0,17
$460$ MPa $< R_{p02} < 690$	0,05	0,14

### 2.4.3.2. **Sonderfall plastischer Fleck**

Wenn die plastische Zone von einem großen elastischen Gebiet umgeben ist und die vollplastische Traglast sehr hoch liegt, ist die ertragbare Dehnung maßgebend:

Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe

$$n_{pl,x} = \sqrt{E * \epsilon_{ertr} / R_p}$$

entfestigende Aluminiumwerkstoffe.

$$n_{pl,x} = \sqrt{E * \epsilon_{ertr} / (\rho_{WEZ} * R_p)}$$

### 2.4.3.3. **Plastische Formzahl**

Berechnung analog nicht geschweißter Bauteile

### 2.4.3.4. **Randschichtverfestigung**

Bei Bauteilen mit mechanischer Randschichtverfestigung ist  $n_{pl}$  zu berechnen wie ohne Randschichtverfestigung.

### 2.4.3.5. **Schweißnahtfaktor (3.3.2.2)**

Der Schweißnahtfaktor ergibt sich für Stahl und Eisengußwerkstoff aus folgenden Tabellen:

Naht	Nahtgüte <sup>◇1</sup>	Spannungsart	S235	S275	S355	S420	St
			GS200 GS240 G17Mn5+QT	P275	P355 G20Mn5+N G20Mn5+Q	S460 S460	
durch- oder gegenge- schweißt	alle	Druck	1,0	1,0	1,0	1,0	C
	nachge- wiesen	Zug oder Schub					
nicht durchge- schweißt oder Kehlnaht	alle	Druck/ Zug oder Schub	0,95	0,85	0,8	0,7	0

<sup>◇1</sup> Die Nahtgüte ist nachgewiesen, wenn bei einem Prüfumfang von 10% der Nähte der Befund der Durchstrahlungs- oder Ultraschallprüfung einwandfrei ist.

Bild 14: Schweißnahtfaktor  $\alpha_w$  für Stahl nach FKM-Tabelle 3.3.5

Tabelle 5.1.26 Schweißnahtfaktor  $\alpha_w$  in geschweißten Bauteilen aus Aluminium nach DIN 4113

Zeile	Werkstoff	Schweißzusatz	Schweißnahtfaktor $\alpha_w$			
			Stumpfnähte			Kehlnähte alle
			Druck; Zug, Güte nach- gewiesen	Zug Güte nicht nach- gewiesen	Schub	
		$S_{\perp}$ bzw. $\sigma_{\perp}$	$T_{\parallel}$ bzw. $\tau_{\parallel}$	$S_{\perp}, T_{\perp}, T_{\parallel}$ $\sigma_{\perp}, \tau_{\perp}, \tau_{\parallel}$		
1	6005A.T6	SG-AISI5	1,00	0,75	0,58	0,58
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn				0,60
2a	6060.T6	SG-AISI5	1,00	0,91	0,55	0,63
2b	6060.T66	SG-AIMg5 AIMg4.5Mn		0,88	0,58	
3	6061.T6/T651	SG-AISI5	0,95	0,74	0,55	0,55
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn				
4a	6063.T6	SG-AISI5	1,00	0,88	0,58	0,62
4b	6063.T66	SG-AIMg5 AIMg4.5Mn				
5	6082.T6/T651 T61/T6151 T5	SG-AISI5	0,90	0,75	0,53	0,53
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn				0,63
6	6106.T6	SG-AISI5 SG-AIMg5 AIMg4.5Mn	1,00		0,58	0,60
7	7020.T6/T651	SG-AIMg5 SG-AIMg4.5Mn	0,92	0,68	0,50	0,50
8	3103.H18	SG-AIMg3 AIMg5 AIMg4.5Mn	1,00	0,89	0,57	0,75
9	3004.H14/H24/H34 H16/H26/H36					
10	3005.H16/H18/H28					0,71
11b	5005A.H12/H22/H32 H14/H24/H34	SG-AIMg3 AIMg5 AIMg4.5Mn	1,00	0,88	0,56	0,81
12b	5049.H14/H24/H34	SG-AIMg3	0,96	0,72		0,56
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn	1,00	0,75	0,59	0,67
13c	5083.H12/H22/H32/H116	SG-AIMg5 AIMg4.5Mn	0,96	0,72	0,55	0,55
14b	5754.H14/H24/H34	SG-AIMg3				
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn	1,00	0,75	0,59	0,64
11a	5005A.O/H111/H112	SG-AIMg3 AIMg5 AIMg4.5Mn	1,00	0,91	0,58	1,20
12a	5049.O/H111/H112	SG-AIMg3				0,91
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn				1,09
13a	5083.Press/O/H111/H112	SG-AIMg5				0,91
13b	5083.Walz/O/H111/H112	AIMg4.5Mn				0,78
14a	5754.O/H111/H112	SG-AIMg3				0,91
		SG-AIMg5 AIMg4.5Mn	1,04			

Bild 15: Schweißnahtfaktor  $\alpha_w$  in geschweißten Bauteilen aus Aluminium nach FKM-Tabelle 5.1.2.6



Für Stumpfstoße aus Formstählen aus S235JR St37-2) und S235JRG1 (alt: Ust37-2) mit  $t > 16$  mm bei Zugbeanspruchung gilt:

$$\alpha_w = 0,55$$

---

## 2.5. Bauteilfestigkeit (3.4)

### 2.5.1. Allgemeines (3.4.0)

Die Bauteilfestigkeit  $\sigma_{SK}$  wird für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile getrennt berechnet.

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.4 Seite 79

---

### 2.5.2. Nicht geschweißte Bauteile (3.4.1)

$$\sigma_{SK} = R_p * n_{pl}$$

### 2.5.3. Geschweißte Bauteile(3.4.2)

#### 2.5.3.1. Allgemeines (3.4.2.0)

Die Werte der Bauteilfestigkeit werden für GW, WEZ und GW je nach Werkstoff Stahl oder Aluminium separat berechnet.

#### 2.5.3.2. Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone (3.4.2.1)

##### Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe:

Für den Grundwerkstoff geschweißte Bauteile gelten:

$$\sigma_{SK} = R_p * n_{pl}$$

$n_{pl}$  Stützziffer

$R_p$  Fließgrenze

Die WEZ wird ignoriert

##### entfestigende Aluminiumwerkstoffe

Für den Grundwerkstoff gilt auch hier  $\sigma_{SK} = R_p * n_{pl}$

Sind die Spannungen im WEZ nicht kleiner als im GW, ist der Nachweis WEZ maßgeblich.

Für WEZ gilt:

$$\sigma_{SK} = R_p * n_{pl} * \rho_{WEZ}$$

$n_{pl}$  Stützziffer

$R_p$  Fließgrenze

$\rho_{WEZ}$  Entfestigungsfaktor

## Schweißnaht SN

Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe

$$\sigma_{SK} = R_p * n_{pl} * \alpha_w$$

$R_p$	Fließgrenze
$\alpha_w$	Schweißnahtfaktor
$K_p$	plastische Formzahl

entfestigende Aluminiumwerkstoffe.

$$\sigma_{SK} = R_p * n_{pl} * \alpha_w * \rho_{WEZ}$$

$R_p$	Fließgrenze
$\alpha_w$	Schweißnahtfaktor
$\rho_{WEZ}$	Entfestigungsfaktor
$K_p$	plastische Formzahl

## Nachweis mit Kerbspannungen

Nur für Baustähle zulässig

$$\sigma_{SK} = R_p * n_{pl,wK}$$

$R_p$	Fließgrenze
$n_{pl,wK}$	plastische Stützzahl

---

## 2.6. Sicherheitsfaktoren (3.5)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.5 Seite 80

---

### 2.6.1. Allgemeines (3.5.0)

Sicherheitsfaktoren werden separat für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile berechnet.

Es werde Teilsicherheitsfaktoren bestimmt, die anschließend zu einem Gesamtsicherheitsfaktor

Berechnung des Gesamtsicherheitsfaktor zusammengefaßt werden. Die Sicherheitsfaktoren beziehen sich auf die Last (vorhandene Spannung) und das Material (ertragbare Spannung).

$j_s$  Lastfaktor  
 $j_F$  Materialfaktor

Der Gesamtsicherheitsfaktor ist das Produkt aus beiden Teilsicherheitsfaktoren

$$j = j_s \cdot j_F$$

$j_s$  = Lastfaktor, wird die Lastannahme als sicher angenommen so ist der Wert 1, andere Faktoren sind in Kapitel 5.7 beschrieben

Der Materialfaktor ergibt sich aus einem Grundsicherheitsfaktor und weiteren Teilsicherheitsfaktoren.

Die Sicherheitsfaktoren beziehen sich auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit der Festigkeitswerte von 97,5 %

## 2.6.2. Einzel-Sicherheitsfaktoren (3.5.1)

### 2.6.2.1. Grundsicherheitsfaktoren

Für den statischen Festigkeitsnachweis werden folgende Grundsicherheitsfaktoren verwendet:

$j_m$  = Sicherheit gegen Bruch für normale und kurzzeitige Temperatur

$j_p$  = Sicherheit gegen Fließen für normale und kurzzeitige Temperatur

$j_{mt}$  = Sicherheit gegen Bruch für langzeitige hohe Temperatur,  
= 1 bei normaler Temperatur

$j_{pt}$  = Sicherheit gegen Fließen für langzeitige hohe Temperatur  
= 1 bei normaler Temperatur

Die Grundsicherheitsfaktoren in der Tabelle gelten für duktilen ( $A > 6\%$ ) und nicht duktilen ( $A < 6\%$ ) Werkstoff

$j_m$ $J_p$ $J_{mt}$ $j_p$ $t$		Schadensfolgen		
		Hoch	Mittel	niedrig
Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Spannung oder der Spannungscombination	hoch	2,0	1,85	1,75
		<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>
		1,5	1,4	1,3
		1,0	1,0	1,0
	niedrig	1,8	1,7	1,6
		<b>1,35</b>	<b>1,25</b>	<b>1,2</b>
		1,35	1,25	1,2
		1,0	1,0	1,0

Bild 2-16: : Sicherheitsfaktoren, entnommen aus FKM-Richtlinie Tabelle 3.5.1 Seite 80

### 2.6.2.2. Teil-Sicherheitsfaktor für Gussbauteile

$j_z$ = zusätzlicher Sicherheitsfaktor für Gussbauteile, bei nichtgeschweißten Bauteilen ist er gleich  $j_G$

GS,GJS, GJM, GJL, Alu-Guss infolge unvermeidbarer Fehler

$j_G = 1,4$  nicht zerstörungsfrei geprüft Gußstücke

$j_G = 1,25$  zerstörungsfrei geprüft Gußstücke

### 2.6.2.3. Teil-Sicherheitsfaktor für geschweißte Bauteile

Für Aluminium-Bauteile ist ein zusätzlicher Teilsicherheitsfaktor zu berücksichtigen:

$j_w=1,13$  (Aluminium)

$j_w=1$  (Walzstahl und Eisenguß)

### 2.6.2.4. Teil-Sicherheitssummand für nicht duktile Gussbauteile

$\Delta j$  zusätzlicher Teilsicherheitsfaktor für nicht duktile Gussbauteile (  $A < 6\%$  ), wenn mit örtlichen Spannungen gerechnet wird.

$\Delta j = 0,5 - \sqrt{A / 24 \%}$

(nur bei örtlichen Spannungen)

### 2.6.3. Gesamtsicherheitsfaktor (3.5.2)

Berechnung des Gesamtsicherheitsfaktors

$$j_{ges} = j_s \cdot \left[ j_z \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_v \cdot R_p}{K_{T,m} R_m}, \frac{j_p}{K_{T,p}}, \frac{j_{mt} \cdot R_p}{K_{Tt,m} R_m}, \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) + \Delta j \right]$$

#### 2.6.3.1. Sonderfälle

$R_p/R_m \leq 0,75$	$j_{ges} = j_s \cdot j_z \cdot \text{MAX} \left( 1; \frac{j_p}{K_{T,p}}; 1; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right)$
$R_p/R_m > 0,75$	$j_{ges} = j_s \cdot j_z \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_v \cdot R_p}{K_{T,m} R_m}; 1; \frac{j_{mt} \cdot R_p}{K_{Tt,m} R_m}; 1 \right)$

$j_s$  Lastfaktor

$j_m$  Einzelsicherheitsfaktoren

$K_{t,m}$  Temperaturfaktoren

$R_m, R_p$  Zugfestigkeit und Fließgrenze

$j_z$  zusätzlicher Teilsicherheitsfaktor für Guss oder für geschweißte Bauteile dabei sollen  $j_G$  und  $j_w$  nicht gemeinsam, nur  $j_G$  (GW und ,WETZ) oder  $j_w$  (SN)

$\Delta j$  zusätzlicher Sicherheitssummand für nichtduktilen Werkstoff

---

## 2.7. Nachweis (3.6)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 3.6 Seite 82

---

### 2.7.1. Allgemeines (3.6.0)

## 2.7.2. Nichtgeschweißte Bauteile (3.6.1)

### 2.7.2.1. Auslastungsgrad der Vergleichsspannung (3.6.1.1)

Der Nachweis ist erbracht, wenn der Auslastungsgrade der Vergleichsspannung maximal 1.

$$a_{SK} = \text{abs} (\sigma_v / (\sigma_{SK} / j_{ges})) \leq 1$$

### 2.7.2.2. Kontrolle der Mehrachsigkeit (3.6.1.2)

Besteht ein hoher Mehrachsigkeitsgrad, muss der Auslastungsgrad der hydrostatischen Spannung auch kontrolliert werden, für Zug als auf für Druck.

( In den meisten Fällen nicht, besonders wenn man sich auf der freien Bauteiloberfläche befindet)

$$a_{SH,Zug} = \text{abs} (\sigma_H / (\sigma_{SH,Zug} / j_{ges})) \leq 1$$

Mehrachsigkeitsgrad:  $h > h_{\max} (1,333)$  und  $h < h_{\min} (-1,333)$

Auslastungsgrad der hydrostatischen Spannung

Für duktile Werkstoffe gilt:

$$\sigma_{SH,Zug} = 1,333 * \sigma_{SK,Zug} \quad \text{und} \quad \sigma_{SH,Druck} = -1,333 * \sigma_{SK,Druck}$$

Semiduktile und spröde Werkstoffe

$$\sigma_{SH,Zug} = K_{NL,Zug} / (0,75 + 0,65 * q) * \sigma_{SK,Zug}$$

$$\sigma_{SH,Druck} = f_{\sigma,Druck} * K_{NL,Druck} / (0,75 + 0,65 * q) * \sigma_{SK,Druck}$$

Hinweis: Sonderfall:  $h = h_{\max} (1,333)$  und  $h = h_{\min} (-1,333)$

## 2.7.3. Geschweißte Bauteile (3.6.2)

### 2.7.3.1. Allgemeines (3.6.2.0)

Bei geschweißten Bauteilen sind alle Nachweise separat für die unterschiedlichen Bereiche (GW, WEZ, SN) zu führen.

### 2.7.3.2. Grundwerkstoff GW und WEZ (3.6.2.1)

**Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe**

$$a_{SK} = (\sigma_v / (\sigma_{SK} / j_{ges})) \leq 1$$

**Entfestigende Aluminiumwerkstoffe**

$$a_{SK} = (\sigma_v / (\sigma_{SK} / j_{ges})) \leq 1$$

### **2.7.3.3. Schweißnaht SN (3.6.2.2)**

## **Nachweis mit Strukturspannungen**

**Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe**

$$a_{SK} = (\sigma_{vw} / (\sigma_{SK,w} / j_{ges})) \leq 1$$

**Entfestigende Aluminiumwerkstoffe**

$$a_{SK} = (\sigma_{vw} / (\sigma_{SK,w} / j_{ges})) \leq 1$$

## **Nachweis mit Kerbspannungen**

**Baustähle**

$$a_{SK,wK} = (\sigma_{vwK} / (\sigma_{SK,wK} / j_{ges})) \leq 1$$







# 3. Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM (4)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 4 Seite 84

---

## 3.1. Allgemeines (4.0)

## 3.2. Spannungskennwerte (4.1)

### 3.2.1. Allgemeines (4.1.0)

In diesem Kapitel werden die Amplitude und die Mittelspannung des Kollektivs festgelegt. Zugspannungen sind positiv, Druckspannungen negativ. Auch die Amplitude hat ein Vorzeichen, was bei der Überlagerung mehrerer Lastfälle notwendig ist.

### 3.2.2. Nichtgeschweißte Bauteile (4.1.1)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 4.1.1 Seite 84

---

Örtliche Spannungen an der unbelasteten Oberfläche stellen einen ebenen Spannungszustand dar und müssen daher in folgende Form existieren:

$$\sigma_x, \sigma_y, \tau = \tau_{xy},$$

Bei örtliche Spannungen an der belasteten Oberfläche sind die drei Hauptspannungen zu verwenden:

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$$

### 3.2.3. Geschweißte Bauteile (4.1.2)

#### 3.2.3.1. Nachweis mit Strukturspannungen (4.1.2.1)

Zum Nachweis werden Strukturspannungen verwendet, die durch Extrapolation auf die Nahtübergangskerbe und Projektion in Richtung senkrecht und parallel zur Schweißnaht erhalten werden (s. Kapitel xyz). Dies sind die Spannungen

$\sigma_{\parallel}$	Normalspannung parallel zur Schweißnaht
$\sigma_{\perp}$	Normalspannung senkrecht zur Schweißnaht
$\tau_{\perp}$	Schubspannung senkrecht zur Schweißnaht

Eine getrennte Berücksichtigung von GW, WEZ und SN wie im statischen Festigkeitsnachweis ist beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis im Allgemeinen nicht erforderlich.

#### 3.2.3.2. Nachweis mit Kerbspannungen (4.1.2.2)

Mit Hilfe des Radaj R1 Konzeptes kann der Nachweis erfolgen. Dazu ist die Schweißnaht detailliert mit einem Ersatzradius von 1 mm abzubilden.

### 3.2.4. Wöhlerlinienkennwerte (4.1.3)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 4.1.2.2 Seite 85

---

Die Wöhlerlinie in doppelt logarithmischer Darstellung besteht aus der horizontal verlaufenden Dauerfestigkeitslinie rechts von Abknickpunkt II und den beiden Zeitfestigkeitsgraden mit den Neigungen  $k$  und  $k_{II}$ .

Die Koordinaten der Abknickpunkte

$$N_D, \sigma_{AK}$$

und

$$N_{D,II}, \sigma_{AK,II}$$

stellen wichtige Referenzpunkte dar.

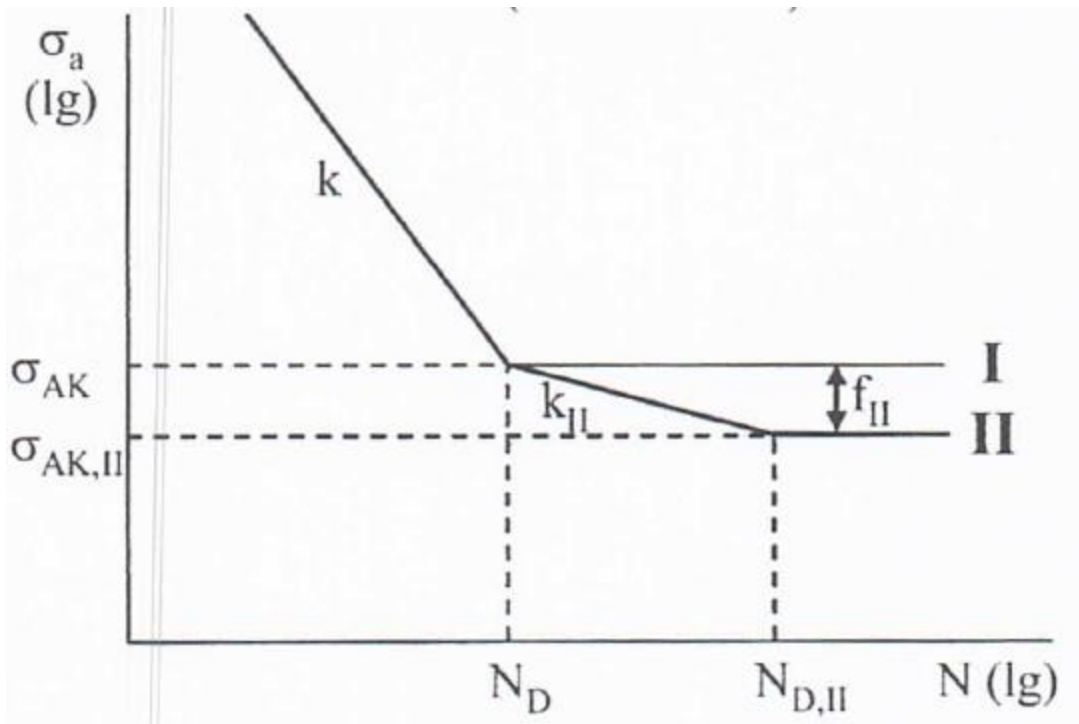


Bild 3-1: Bereiche der Wöhlerlinie mit Bezeichnungen

### 3.2.5. Anpassung des Spannungskollektivs an die Bauteil-Wöhlerlinie (4.1.4)

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 4.1.4 Seite 86

Ein reales Spannungskollektiv weist oftmals Mittelspannungen auf während die Wöhlerlinie meist für reine Wechselbeanspruchung gegeben ist, so dass eine Umrechnung auf  $R=-1$  erfolgen muß. Weiterhin kann die Verwendung einer schadensgleichen Spannungsamplitude, die das gesamte Kollektiv ersetzt, sinnvoll sein.

#### 3.2.5.1. Umrechnung auf Spannungsverhältnis $R=-1$

Spannungszustände, bei denen eine Mittelspannung existiert, werden auf schadensgleiche Spannungsamplituden OHNE Mittelspannung ( $R=-1$ ) umgerechnet, was durch die Amplitudentransformation erfolgt. Dies erfolgt, da die Wöhlerkurve für  $R=-1$  gilt ! Dies wird durch den Faktor  $K_{AK,i}$  realisiert.

$$\sigma_{a,W,i} = \sigma_{a,i} / K_{AK,i}$$

### 3.2.6. Umrechnung auf Äquivalentenspannungsamplitude (4.1.5)

Eine Äquivalentenspannungsamplitude ersetzt das gesamte Kollektiv durch eine einzige Spannungsamplitude mit Lastspielzahl des linken Abknickpunktes. Darin stellen  $\sigma_{a,1}$  den Kollektivgrößtwert und  $K_{BK}$  den Betriebsfestigkeitsfaktor dar.

$$\sigma_{\text{äqu}} = \sigma_{a,1} / K_{BK}$$

Die Äquivalentenspannungsamplitude ermöglicht ein identisches Vorgehen wie beim Dauerfestigkeitsnachweis.

## 3.3. Werkstoffkennwerte (4.2)

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 4.2 Seite 87

### 3.3.1. Nichtgeschweißte Bauteile (4.2.1)

Die Werkstoff-Wechselhaftigkeit ohne konstruktiven Einfluss jedoch unter Beachtung der Bauteilgröße wird ermittelt durch:

$$\sigma_{W,zf} = f_{W,\sigma} * R_m$$

$$\tau_{W,zf} = f_{W,\tau} * \sigma_{W,zf}$$

Werkstoffgruppe	$f_{W,\sigma}$	$f_{W,\tau}$
Einsatzstahl	0,40 <sup>◇2</sup>	0,577 <sup>◇2◇3</sup>
nichtrostender Stahl	0,40 <sup>◇4</sup>	0,577
Schmiedestahl	0,40 <sup>◇4</sup>	0,577
Stahl außer diesen	0,45	0,577
GS	0,34	0,577
GJS	0,34	0,65
GJM	0,30	0,75
GJL	0,34	1,0 <sup>◇5</sup>
Aluminiumknetwerkstoff	0,30 <sup>◇6</sup>	0,577
Aluminiumgusswerkstoff	0,30 <sup>◇6</sup>	0,75

Bild 3-2: Tabelle aus ,FKM Richtlinie für die Abminderungsfaktoren  $f_w$

### 3.3.2. Geschweißte Bauteile (4.2.2)

Für geschweißte Bauteile gibt es keine speziellen Werkstoffkennwerte. Stattdessen werden entsprechende Konstruktionsfaktoren verwendet.

### 3.3.2.1. Temperaturfaktor

Gilt gleichermaßen für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile

**Normale Temperaturen:**  $K_{T,D} = 1$

(mit steigender Temperatur nimmt die Bauteilwechselfestigkeit ab)

Der Faktor  $K_{T,D}$  fließt nicht in die Bauteilwechselfestigkeit ein, sondern in den Sicherheitsfaktor

Werkstoff	ab °C	bis °C
Feinkornbaustahl	-40	60
anderer Stahl	-40	100
Eisengusswerkstoff	-25	100
ausgehärteter Aluminiumwerkstoff	-25	50
nicht ausgehärteter Aluminiumwerkstoff	-25	100

Bild 3-3: Tabelle entnommen aus der FKM-Richtlinie Niedere Temperaturen liegen außerhalb des Anwendungsbereichs

#### Niedrige Temperatur:

Niedrigere Temperaturen unterhalb des angegebenen Bereiches liegen außerhalb des Bereiches der Anwendung der FKM-Richtlinie

**Höhere Temperaturen:** Bei Stahl und Eisengusswerkstoffe bis 500 °C  
bei Aluminiumwerkstoffe bis 200 °C

Aluminiumwerkstoffe:  $K_{T,D} = 1 - a_{T,D} \cdot 10^{-3} \cdot (T_{[°C]} - 50)$

Feinkornbaustahl:  $K_{T,D} = 1 - 10^{-3} \cdot T_{[°C]}$

GJS (1,6), GJM ( 1,3 ) , GJL (1,0)  $K_{T,D} = 1 - a_{TD} \cdot 10^{-3} \cdot (T_{[°C]})$

Andere Stahl außer nichtrostender Stahl  $K_{T,D} = 1 - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{[°C]} - 100)$

GS  $K_{T,D} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{[°C]} - 100)$

Aluminiumwerkstoff  $K_{T,D} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{[°C]} - 50)$

( Der statische Nachweis hat andere Temperaturfaktoren )

---

## 3.4. Konstruktionskennwerte (4.3)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap. 4.3 Seite 89

---

### 3.4.1. Nichtgeschweißte Bauteile (4.3.1)

$$K_{WK,\sigma} = \frac{1}{n_\sigma} * \left(1 + \frac{1}{\tilde{K}_f} * \left(\frac{1}{K_R} - 1\right)\right) * \frac{1}{K_V * K_S * K_{NL}}$$

$$K_{WK,\tau} = \frac{1}{n_\tau} * \left(1 + \frac{1}{\tilde{K}_f} * \left(\frac{1}{K_R} - 1\right)\right) * \frac{1}{K_V * K_S}$$

$K_t$	Formzahl für Zug/Druck / Biegung / Schub / Torsion
$n_{(r/d)}$	Stützzahl für Zug/Druck / Schub / [Biegung / Torsion]
$K_R$	Rauheitsfaktor für Zug/Druck / Schub
$K_V$	Randschichtfaktor
$K_{NL,E}$	Konstante für GJL
$K_S$	Schutzschichtfaktor
$\tilde{K}_f$	Schätzwert der Kerbwirkungszahl

### 3.4.2. Kerbwirkungszahlen (4.3.1.2)

#### 3.4.2.1. Schätzwert der Kerbwirkungszahlen für örtliche Spannungen

( nur notwendig wenn die Oberflächenrauigkeit berücksichtigt werden soll )

$$\tilde{K}_f = \text{MAX}(K_{t,\sigma} / n_\sigma; 1)$$

$$\tilde{K}_f = \text{MAX}(K_{t,\tau} / n_\tau; 1)$$

Näherungsformel für  $K_t = \text{MAX}(10^{0,066-0,36*\lg(r/b)}; 1)$

$r$  = Kerbradius, falls nicht gegeben, dann  $r=2/G_\sigma$  oder  $r=1/G_\tau$

$b$  = Wanddicke, falls nicht gegeben

$b = \text{deff}/2$  ( vergütetem Vergütungsstahl, einsatzgehärtetem Einsatzstahl, vergütetem und nitriertem Nitrierstahl, Vergütungsstahlguss, GJS, GJM , GJL)

$b = \text{deff}$  ( unlegiertem Baustahl, Feinkornbaustahl, normalgeglühtem Vergütungsstahl, Stahlguss und Aluminiumwerkstoff )



$n_{r,\sigma}$  siehe nächste Folie. Es können jedoch auch die Werte aus der Tabelle verwendet werden:

Werkstoff- gruppe	Stahl Aluknet.	GS	GJS	GJM Aluguss	GJL
	2,0	2,0	1,5	1,2	1,0

Bild 3-4: Tabelle 4.3.1 aus FKM-Richtlinie

### 3.4.2.2. Stützzahlen $n_{r/\sigma}$

Die Gesamtstützzahl setzt sich aus folgenden Faktoren zusammen:

$$n_{\sigma} = n_{st} * n_{vm} * n_{bm}$$

### 3.4.2.3. Stützzahl $n_{st}$ (statistische)

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap.4.3.1.3.2 Seite 91

Die statistische Stützzahl  $n_{st} = (A_{ref,st}/A_{\sigma,st})^{1/k_{st}}$

Ist für alle Spannungsarten gleich

Berücksichtigt den Größeneinfluss

Ist das Verhältnis der hoch beanspruchten Oberfläche  $A_{\sigma,st}$  und einer Referenzprobe  $A_{ref,st}$  (zylindrische Rundprobe,  $D = 8\text{mm}$ ,  $p = 20\text{mm} \rightarrow 500\text{mm}^2$ )

Die hoch beanspruchten Oberfläche  $A_{\sigma,st}$  für einfache Geometrien ist in der FKM-Richtlinie definiert

Der Weibull-Exponent  $k_{st}$ , kann auf

der FKM Tabelle 2.3.2 / 4.3.3

entnommen werden

Werkstoff- gruppe	Stahl	GS	GJS, GJM, GJL	Alu- knet.	Alu- guss.
$k_{st}$	30	15	10	20	10

Bild 3-5: Tabelle entnommen aus FKM-Richtlinie

### 3.4.2.4. Stützzahl $n_{vm}$ (verformungsmechanische)

Stützzahl  $n_{vm}$

- Ist für alle Spannungsarten gleich
- Berücksichtigt die Makrostützwirkung nach Neuber
- Ist für duktile Stähle und Aluminiumknetlegierung -> sonst  $n_{vm} = 1$

$$n_{vm} = \text{sqrt}(1 + E \cdot \epsilon_{pl,w} / \sigma_w * n_{st}^{(1/n'-1)})$$

$n'$  für Stahl = 0,15; Aluminiumknetlegierungen = 0,1

$\epsilon_{pl,w}$  Dauerfest ertragbare wechselflastische Dehnung

Aluminiumknetlegierungen  $1,6 \cdot 10^{-5}$

Stahl  $R_m < 630 = 2 \cdot 10^{-4}$

Stahl  $R_m \geq 630 = 2 \cdot 10^{-4} * (1 - 0,375(R_m / 630 - 1))$

### 3.4.2.5. Stützzahl $n_{bm}$ für örtl. Spannungen (bruchmechanische)

erfasst das langsamere Wachstum eines Ermüdungsrisses im gradientenbehaftete Beanspruchungsfeld, gegenüber einem homogenen Feld gleicher Beanspruchung

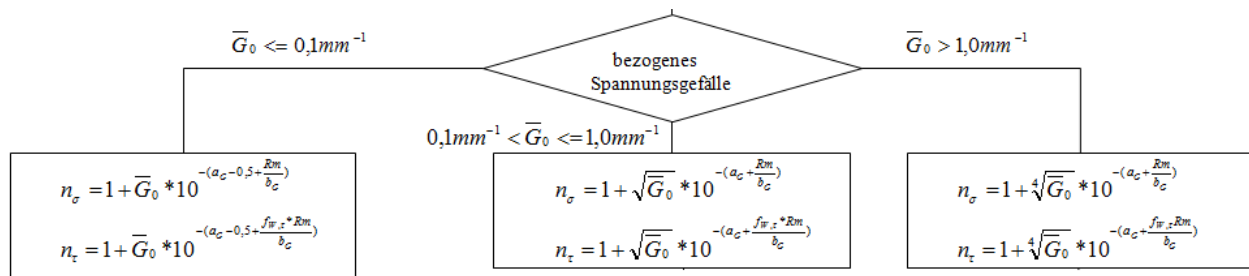
$$n_{bm} = \frac{5 + \sqrt{G \cdot mm}}{5 \cdot n_{vm} \cdot n_{st} + \frac{R_m}{R_{m,bm}} \sqrt{\frac{7,5 + \sqrt{G \cdot mm}}{1 + 0,2 \cdot \sqrt{G \cdot mm}}}}$$

G bezogenes Spannungsgefälle

$R_{m,bm}$  Referenzzugfestigkeit -> Stahl = 680 MPa; Aluminium = 270 MPa

### 3.4.2.6. Stützzahl $n_{T/G}$ nach Sieler

Verwendet das bezogene Spannungsgefälle



	Einsatzstahl [steel]	nicht.rost.S. [not rust steel]	SchmiedeS. [forge steel].	FeinkornbausS. [fine grain steel].	Walzstahl [low alloy steel]	Undef. [undefined].	Stahlguß [cast steel]	Grauguß [gray iron]	Spärguß [GGG]	Temperguß [malleable iron]	Aluknet [alu]	Aluguß [cast alu]
aG	0,50	0,4	0,50	0,50	0,5	0,5	0,25	-0,05	0,05	-0,05	0,05	-0,05
bG	2700	2400	2700	2700	2700	2700	2000	3200	3200	3200	850	3200

Bild 3-6: Tabelle entnommen aus FKM-Richtlinie

### 3.4.3. Das bezogene Spannungsgefälle $G_\sigma$ (Nennspannung)

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap.4.3.1.3.3 Seite 92

Das bezogene Spannungsgefälle  $G_\sigma$  (örtliche Spannungen)

Formeln

$$G_\sigma = \frac{1}{\sigma_{1a}} \cdot \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta s} \quad G_\tau = \frac{1}{\tau_{1a}} \cdot \frac{\Delta\tau_a}{\Delta s}$$

Falls keine FE-Rechnung vorliegt gilt

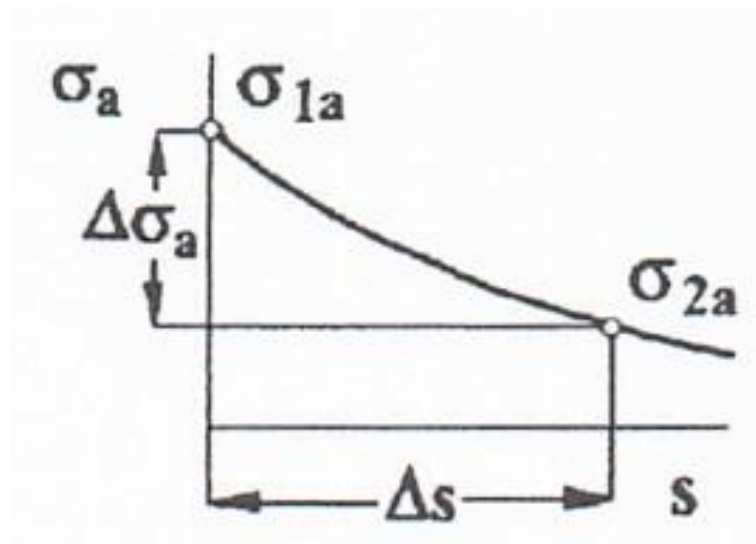


Bild 3-7: Referenzpunkte zur Ermittlung des bezogenen Spannungsgradienten

$$G_\sigma = 2/r+2/d \quad \text{und} \quad G_\tau = 1/r+2/d$$

In diesem Fall gilt für überlagerte Kerben  $G = G_1 + G_2$

( Der Abstand beider Kerben sollte kleiner als  $2r$  sein )

Das bezogene Spannungsgefälle wird automatisch ermittelt, wenn der VIEWER4WINLIFE verwendet wird. Der Algorithmus ist an anderer Stelle im Handbuch beschrieben.

### 3.4.4. Rauheitsfaktor

Polierte Probe hat  $K_{R,\sigma/\tau} = 1$

Walzhaut, Schmiedehaut und Guss Haut gilt  $K_{R,\sigma/\tau} = 200 \mu m$

$$K_{R,\sigma} = 1 - a_{R,\sigma} * \lg(R_{z[\mu m]}) * \lg\left(2 * \frac{R_m}{R_{m,N,\min}}\right)$$

$$K_{R,\tau} = 1 - f_{W,\tau} * a_{R,\sigma} * \lg(R_{z[\mu m]}) * \lg\left(2 * \frac{R_m}{R_{m,N,\min}}\right)$$

	Einsatzstahl [steel]	nicht.rost.S. [not rust steel]	SchmiedeS. [forge steel].	Feinkornbaus. [fine grain steel].	Walzstahl [low alloy steel]	Undef. [undefined].	Stahlguß [cast steel]	Grauguß [gray iron]	Späroguß [GGG]	Temperguß [malleable iron]	Aluknet [alu]	Aluguß [cast alu]
aRs	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,20	0,06	0,16	0,12	0,22	0,20
RmNmin	400	400	400	400	400	400	400	100	400	350	133	133

Bild 3-8: Tabelle 2.3.6 / 4.3.5 entnommen aus FKM-Richtlinie

Bei randschichtgehärteten Bauteilen und bei einem Anrissort am Rand, wegen der höheren Zugfestigkeit ( $R_m$ ), ungünstiger.

Bei experimentell ermittelten Kerbwirkungszahlen braucht der Rauheitsfaktor nicht berücksichtigt werden.

Außer es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen Probe und Bauteil

$$\tilde{K}_{R,\sigma/\tau} = K_{R,\sigma/\tau}(R_z) / K_{R,\sigma/\tau}(R_{z,Probe})$$

### 3.4.5. Geschweißte Bauteile (4.3.2)

#### 3.4.5.1. Allgemeines (4.3.2.0)

Folgende Konstruktionskennwerte sind für geschweißte Bauteile Maßgebend:

FAT <sub>L</sub>	Bauteilklasse
f <sub>FAT,σ</sub>	Umrechnungsfaktor von Bauteilklasse auf Bauteil-Wechselspannungsfestigkeit
f <sub>t</sub>	Dickenfaktor
K <sub>v</sub>	Randschichtfaktor

#### 3.4.5.2. Bauteilklasse (FAT) und Umrechnungsfaktor ((4.3.2.1)

Die FAT-Klassen werden bei Stahl, Eisengußwerkstoffen und Aluminium für Normalspannungen senkrecht, parallel und für Schubspannungen angewendet. Die Bauteilklasse entspricht der Doppelamplitude bei der Bezugszyklenzahl  $N_c$ . Das Spannungsverhältnis zwischen Bezugszyklenzahl und Bauteilwöhlerlinie hängt vom Exponenten  $k$  ab.

Die Bauteilklasse FAT stellt die Schwingweite der Spannung bei der Bezugszyklenzahl dar. Diese beträgt bei der FKM-Richtlinie  $N_c = 2 \cdot 10^6$  Zyklen. Der Abknickpunkt der Wöhlerlinie weicht davon ab! Die Umrechnung zwischen Bezugszyklenzahl und Abknickpunktzyklenzahl erfolgt nach den Gleichungen:

$$f_{FAT,\sigma} = \left(\frac{N_c}{N_{D,\sigma}}\right)^{\frac{1}{k_\sigma}}$$

$$f_{FAT,\tau} = \left( \frac{N_C}{N_{D,\tau}} \right)^{\frac{1}{k_\tau}}$$

Normalspannung

Bauteil	$N_{D,\sigma}$	$N_{D,II,\sigma}$	$k_\sigma$	$k_{II,\sigma}$	$f_{II,\sigma}$	$k_\tau$
Stahl und Eisengußwerkstoff (WL-Typ 1)						
nichtgeschweißt	$10^6$		5			
geschweißt	$5 \cdot 10^6$		3			
Aluminiumwerkstoffe und austenitischer Stahl (WL-Typ 2)						
nichtgeschweißt	$10^6$	$10^8$	5	15	0,74	
geschweißt	$5 \cdot 10^6$		3			

Schubspannung

Bauteil	$N_{D,\tau}$	$N_{D,II,\tau}$	$k_\tau$	$k_{II,\tau}$	$f_{II,\tau}$	$k_\tau$
Stahl und Eisengußwerkstoff (WL-Typ 1)						
nichtgeschweißt	$10^6$		8			
geschweißt	$10^8$		5			
Aluminiumwerkstoffe und austenitischer Stahl (WL-Typ 2)						
nichtgeschweißt	$10^6$	$10^8$	8	25	0,83	
geschweißt	$10^8$		5			

$N_{D,\sigma}, N_{D,\tau}$	Knickpunktzyklenzahl der Bauteilwöhlerlinie
$N_C$	Bezugszyklenzahl der Bauteilklasse $0,2 \cdot 10^6$
$k_\sigma, k_\tau$	Wöhlerexponent

$$f_{FAT,\sigma} = 1/2,71 = 0,37$$

$$f_{FAT,\tau} = 1/4,37 = 0,23$$

### 3.4.5.3. Dickenfaktor (4.3.2.2)

Für den Fall A nach FKM-Richtlinie, der den IIW-Empfehlungen entspricht, gilt:

Für Blechdicke  $\leq 25$  mm gilt

$$f_t = 1,0$$

Für Blechdicke  $t > 25$  mm gilt

$$f_t = \left( \frac{25 \text{ mm}}{t} \right)^n$$

Der Exponent n ist nach folgender Tabelle zu wählen

	Art der Schweißverbindung	n
Fall A4/B4	querbelastete Kreuz- und T-Stöße, Bleche mit Quersteifen, wie geschweißt	0,3
Fall A3/B3	querbelastete Kreuz- und T-Stöße, Bleche mit Quersteifen, Nahtübergang beschliffen	0,2
Fall A2/B2	querbelastete Stumpfstöße, wie geschweißt	0,2
Fall A1/B1	Stumpfstöße, blecheben beschliffen, Grundwerkstoff, längsbeanspruchte Schweißnähte oder Anschweißteile	0,1

Für Fall B gilt:

Für Blechdicke  $\leq 10$  mm gilt

$$f_t = 1,1$$

Für Blechdicke  $10 \text{ mm} < t \leq 25$  mm gilt

$$f_t = \left( \frac{25 \text{ mm}}{t} \right)^{0,1}$$

Für Blechdicke  $> 25$  mm gilt:

$$f_t = \left( \frac{25 \text{ mm}}{t} \right)^n$$

Der Exponent ist nach der oben gegebenen Tabelle zu wählen

### 3.4.6. Randschichtfaktor

<p>Ohne = <math>K_V = 1</math>  Mit -&gt; entsprechend Tabelle  Für Alu können  Die Werte für  Eisengusswerkstoffe  näherungsweise  verwendet werden.  Entnommen aus der  FKM-Richtlinie  Tabelle 2.3.8</p>				Verfahren	nichtgekerbte Bauteile $\ast^3$	gekerbte Bauteile
				<b>Stahl</b>		
				<i>Chemisch-thermische Verfahren</i>		
				Nitrieren Härtetiefe 0,1 ... 0,4 mm Oberflächenhärte 700 ... 1000 HV 10	1,10 - 1,15 (1,15 - 1,25)	1,30 - 2,00 (1,90 - 3,00)
				<i>Thermische Verfahren</i>		
				Einsatzhärten Härtetiefe 0,2 ... 0,8 mm Oberflächenhärte 670 bis 750 HV 10	1,10 - 1,50 (1,20 - 2,00)	1,20 - 2,00 (1,50 - 2,50)
				Karbonitrierhärten Härtetiefe 0,2 ... 0,4 mm Oberflächenhärte minimal 670 HV 10	(1,80)	
				<i>Eisengusswerkstoff</i>		
				Nitrieren	1,10 (1,15)	1,3 (1,9)
				Einsatzhärten	1,1 (1,2)	1,2 (1,5)
				Festwalzen	1,1 (1,2)	1,3 (1,5)
				Kugelstrahlen	1,1 (1,1)	1,1 (1,4)
				Induktivhärten, Flammhärten	1,2 (1,3)	1,5 (1,6)
				<i>Mechanische Verfahren</i>		
			Festwalzen	1,10 - 1,25 (1,20 - 1,40)	1,30 - 1,80 (1,50 - 2,20)	
			Kugelstrahlen	1,10 - 1,20 (1,10 - 1,30)	1,10 - 1,50 (1,40 - 2,50)	

Bild 3-9: Tabellen entnommen aus FKM-Richtlinie

Wird für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile angewendet

### 3.4.7. Schutzschichtfaktor

Berücksichtigt den Einfluss einer Schutzschicht eines Bauteils aus Aluminiumwerkstoff.

Alle anderen Werkstoffe ist  $K_S = 1$

Abbildung 2.3-4

entnommen aus

FKM-Richtlinie

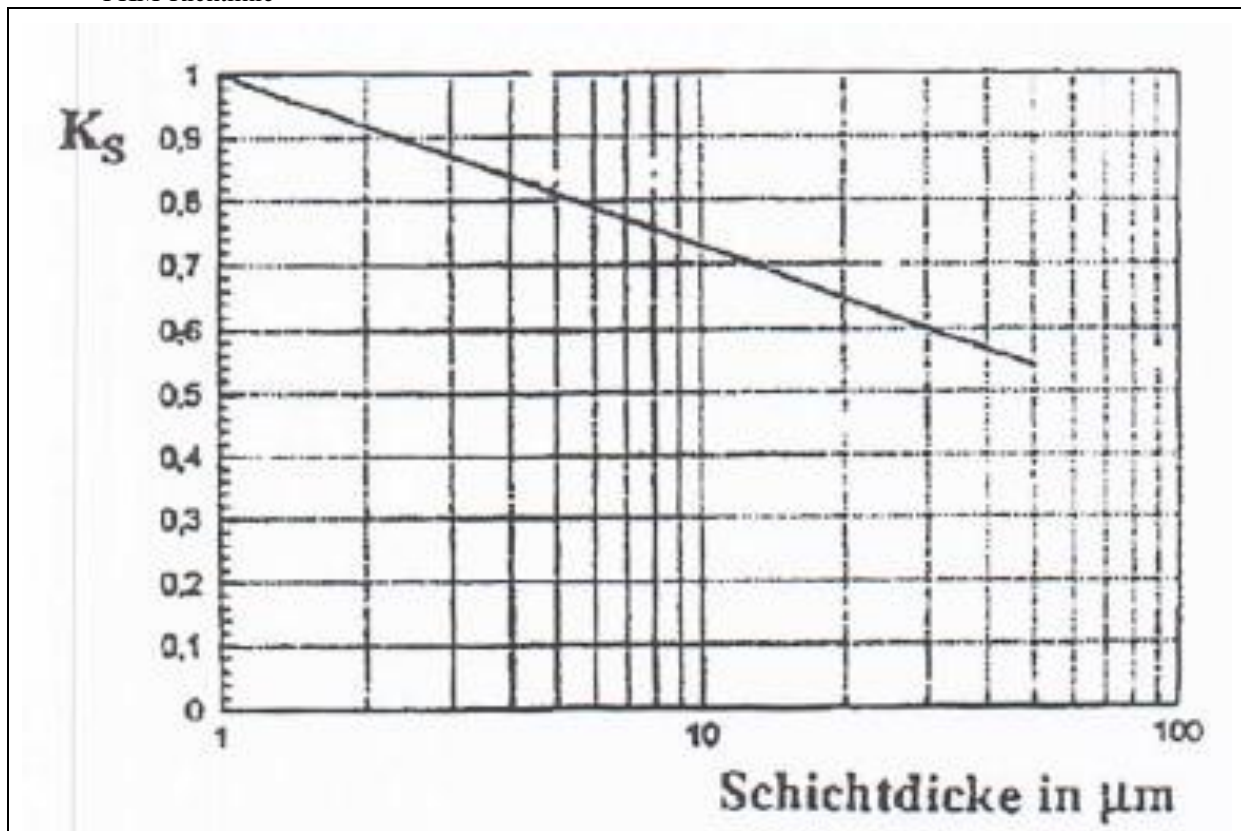


Bild 3-10: Abbildung 2.3-4 entnommen aus FKM-Richtlinie

Wird nicht bei Schweißnähten angewendet.



### 3.4.8. Faktor $K_{NL,E}$

Die Konstante  $K_{NL,E}$  dient der Berücksichtigung des nichtlinearen Spannungs-Dehnungsverhalten von GJL bei Biegung oder wenn die wesentliche Beanspruchung Biegung ist.

Alle anderen Werkstoffe ist  $K_{NL,E} = 1$

Werkstoffsorte	GG -100	GG -150	GG -200	GG -250	GG -300	GG -350
$K_{NL,E}$	1,075		1,05		1,025	

Bild 3-11: Entnommen Tabelle 2.3.9 aus FKM-Richtlinie

Wird für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile angewendet.

---

## 3.5. Bauteilfestigkeit (4.0)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap.4.4 Seite 96

---

### Überblick

**Bauteil-Wechselfestigkeit** unter Berücksichtigung der Konstruktionsfaktoren aus der Werkstoffwechselfestigkeit

**Bauteil-Dauerfestigkeit** unter Berücksichtigung des Mittelspannungsfaktors aus der Bauteil-Wechselfestigkeit

**Bauteil-Betriebsfestigkeit** unter Berücksichtigung des Betriebsfestigkeitsfaktor

(Spannungskollektiv, Bauteil-Wöhlerlinie) aus der Bauteil-Dauerfestigkeit

Auslastungsgrad =

vorhandene Spannungsamplitude / (Bauteilbetriebsfestigkeit \* Sicherheit)

### 3.5.1. Bauteil-Wechselfestigkeit (4.4.1)

#### 3.5.1.1. Nicht geschweißte Bauteile (4.4.1.1)

unter Berücksichtigung der Konstruktionsfaktoren

$$S_{WK,zd/by/bz} = 1 / K_{WK,zd/by/bz} * \sigma_{W,zd}$$

$$T_{WK,,sy/sz/t} = 1 / K_{WK,sy/sz/t} * \tau_{W,s}$$

Hinweis: Unterschied Nennspannung und örtliche Spannungen -> S u.  $\sigma$

$$\sigma_{WK} = 1 / K_{WK} * \sigma_{W,zd}$$

$$\tau_{WK} = 1 / K_{WK} * \tau_{W,s}$$

#### 3.5.1.2. Geschweißte Bauteile (4.4.1.2)

Die folgenden Gleichungen gelten für die Wechselfestigkeit im Abknickpunkt:

Normalspannungen senkrecht zur  
Schweißnaht

$$\sigma_{WK,\perp} = \text{FAT}_{\perp} f_{\text{FAT},\sigma} f_t K_V K_{\text{NLE}}$$

Normalspannungen parallel zur  
Schweißnaht

$$\sigma_{WK,\parallel} = \text{FAT}_{\parallel} f_{\text{FAT},\sigma} f_t K_V K_{\text{NLE}}$$

Schub / Torsion

$$\tau_{WK} = \text{FAT}_{\tau} f_{\text{FAT},\tau} f_t K_V$$

Die Normalspannungskennwerte gelten für die Zyklenzahl  $N_{D,\sigma} = 5 \cdot 10^6$ , der Schubspannungskennwert für  $1 \cdot 10^8$ .

FAT $_{\perp}$	Bauteilklasse
f $_{\text{FAT},\sigma}$	Umrechnungsfaktor von Bauteilklasse auf Bauteil-Wechselfestigkeit
f $_t$	Dickenfaktor
K $_V$	Randschichtfaktor
K $_{\text{NLE}}$	Konstante für GJL

## 3.5.2. Bauteil-Dauerfestigkeit (4.4.2)

### 3.5.2.1. Allgemeines (4.4.2.0)

Die Berechnung gilt – mit jeweils anderen Eingangswerten – für nichtgeschweißte und geschweißte Bauteile.

In der FKM-Richtlinie wird das Spannungsverhältnis  $R$  für die größte Amplitude des Kollektivs berechnet und für alle Kollektivstufen vereinfachend als gleich angenommen.

winLIFE 4.0 2018 hingegen rechnet für jede Kollektivstufe das individuelle Spannungsverhältnis aus und berücksichtigt dies bei der Berechnung. Dieser „exakte“ Weg führt in der Regel nur zu geringen Unterschieden, da die Spannungsverhältnisse in einem Kollektiv meist nicht sehr schwanken und außerdem meist von der größten Amplitude die höchste Schädigung ausgeht.

### 3.5.2.2. Nicht geschweißte Bauteile (4.4.2.1)

### 3.5.2.3. Amplitude der Dauerfestigkeit (4.4.2.1.1)

Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit je nach Mittelspannung

$$S_{AK,zd/by/bz} = K_{AK,zd/by/bz} * S_{WK,zd/by/bz}$$

$$T_{AK,sy/sz/t} = K_{AK,sy/sz/t} * S_{WK,sy/sz/t}$$

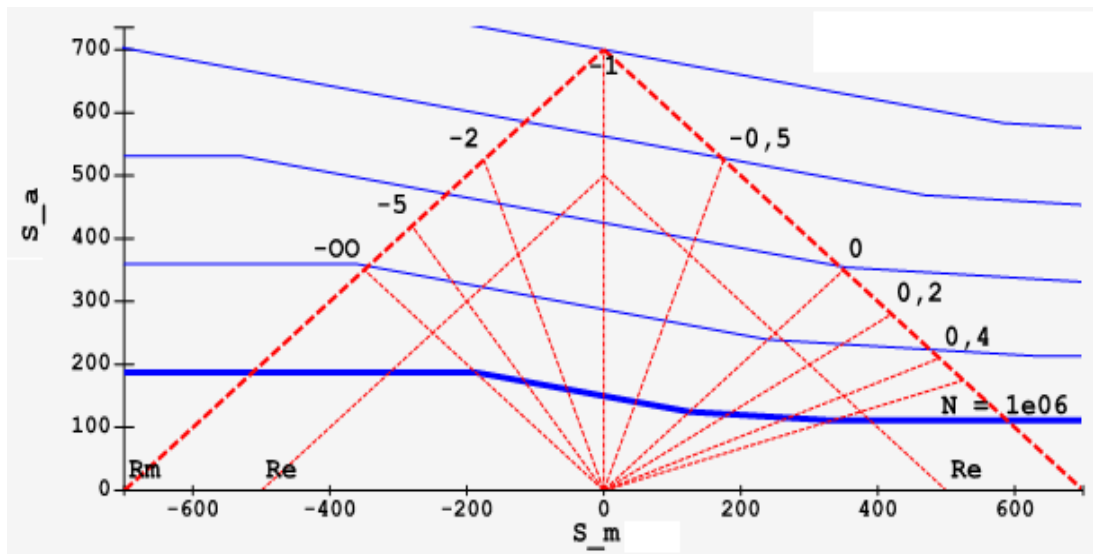


Bild 3-12: Haigh Diagramm für Zug-Druck und Biegung (asymmetrisch zur Ordinate)

## Mittelspannungsempfindlichkeit (4.4.2.1.2)

Die Bauteil-Mittelspannungsempfindlichkeit beschreibt mit dem Mittelspannungsfaktor die Veränderung der Amplitude der Bauteildauerfestigkeit in Abhängigkeit der Mittelspannung

$$M_{\sigma} = a_M * R_m * 10^{-3} + b_M$$

$$M_{\tau} = f_{w,\tau} * M_{\sigma}$$

	Einsatzstahl [steel]	nicht.rost.S. [not rust steel]	SchmiedeS. [forge steel].	Feinkornbaus. [fine grain steel].	Walzstahl [low alloy steel]	Undef. [undefined].	Stahlguß [cast steel]	Grauguß [gray iron]	Spärguß [GGG]	Temperguß [malleable iron]	Aluknet [alu]	Aluguß [cast alu]
AM	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0	0,35	0,35	1	1
BM	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	0,5	0,08	0,13	-0,04	0,2

Bild 3-13: Tabelle entnommen aus FKM-Richtlinie

## Eigen Spannungsfaktor (4.4.2.1.3)

Der Eigen Spannungsfaktor für ungeschweißte Bauteile ist nur bei Berechnung des Mittelspannungsfaktors zu berücksichtigen und beträgt:

$$K_{E,\sigma} = K_{E,\tau} = 1$$

### 3.5.2.4. Geschweißte Bauteile (4.4.2.2)

Formel übernehmen

## Mittelspannungsempfindlichkeit (4.4.2.2.2) und Eigen Spannungsfaktor (4.4.2.2.3)

Eigen Spannung	$K_{E,\sigma}$	$M_{\sigma}$	$K_{E,\tau}$	$M_{\tau}^{*1}$
Hoch	1,00	0	1,00	0
mäßig	1,26	0,15	1,15	0,09
gering	1,54	0,30	1,30	0,17

<sup>1</sup> Für Schubspannung gilt  $M_{\tau} = f_{w,\tau} \cdot M_{\sigma}$ ,  $f_{w,\tau} = 0,577$

Der Mittelspannungsfaktor  $K_{A,K}$  wird mit Hilfe der Amplitudentransformation berechnet.

### 3.5.2.5. **Dauerfestigkeitsschaubild (4.4.2.3)**

### 3.5.2.6. **Mittelspannungsbereich Normalspannungen**

- Bereich I  $R > 1$ , Druckschwellbereich
- Bereich II  $-\infty \leq R < -1$  Druckwechselbereich  
 $-1 \leq R \leq 0$  Zugwechselbereich
- Bereich III  $0 < R < 0,5$  niedriger Zugschwellbereich
- Bereich IV  $R \geq 0,5$  hoher Zugschwellbereich

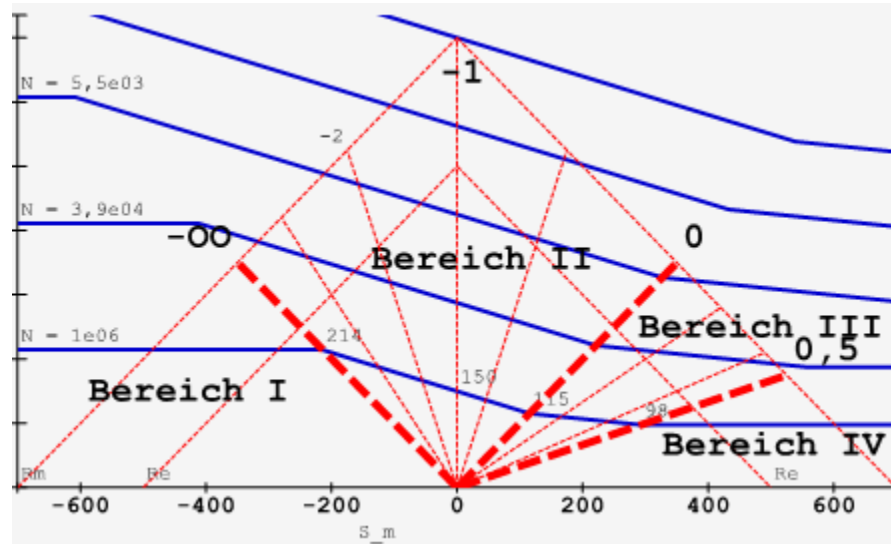


Bild 3-14: Bereiche mit unterschiedlichen Mittelspannungseinflüssen im Haigh-Diagramm

### 3.5.3. Mittelspannungsbereich Schubspannungen

Bereich I  $R > 1$ , entfällt

Bereich II andere untere Grenze

$$-1 \leq R \leq 0 \text{ Zugwechselbereich}$$

Bereich III  $0 < R < 0,5$  niedriger Zugschwellbereich

Bereich IV  $R \geq 0,5$  hoher Zugschwellbereich

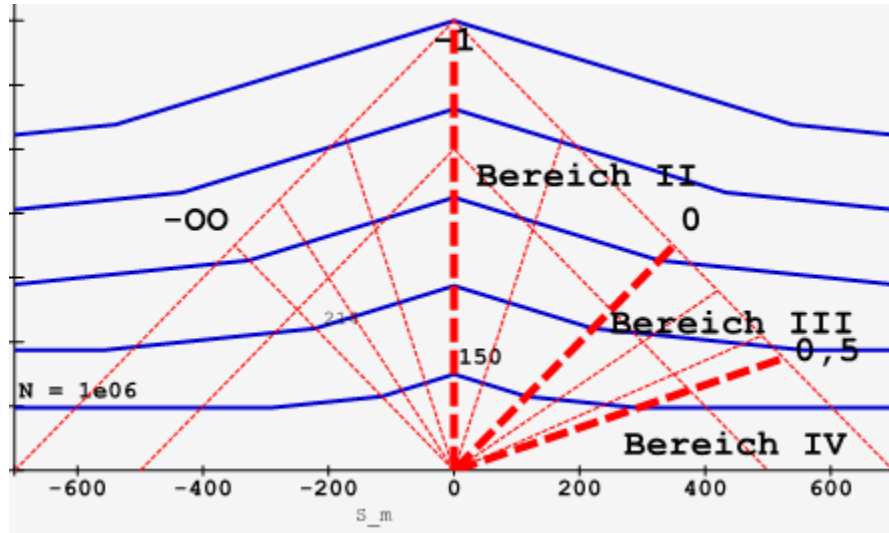


Bild 3-15: Haigh-Diagramm für Schub bzw. Torsion (symmetrisch zur Ordinate)

### 3.5.4. Mittelspannungsfaktor (4.4.2.4)

**Mittelspannungsfaktor** ist abhängig von einer möglichen Laststeigerung im Betrieb abhängig.

F1 → Mittelspannung  $S_m$  konstant

F2 → Spannungsverhältnis  $R$  konstant

$$S_m / S_a = (1+R)/(1-R)$$

F3 → Minimalspannung  $S_{\min}$  konstant

F4 → Maximalspannung  $S_{\max}$  konstant

Bereich I

$$K_{AK} = \frac{1}{1-M_\sigma}$$

Bereich II

$$K_{AK} = \frac{1}{1+M_\sigma \cdot S_m / S_a}$$

Bereich III

$$K_{AK} = \frac{3+M_\sigma}{(1+M_\sigma) \cdot (3+M_\sigma \cdot S_m / S_a)}$$

Bereich IV

$$K_{AK} = \frac{3+M_\sigma}{3 \cdot (1+M_\sigma)^2}$$

Schubspannungen → nur  $R \geq -1$  und Indizes 's' (Schub) und 't' (Torsion)

## Überlastungsfall

Die FKM-Richtlinie definiert Überlastungsfälle F1, F2, F3, F4, bei denen z.B. die Mittellast oder das Spannungsverhältnis konstant ist. Diese Fallunterscheidung ist nach der Berechnungsmethodik der FKM-Richtlinie notwendig, da das Spannungsverhältnis für ein Kollektiv standardmäßig als konstant angenommen wird. Bei den Überlastungsfällen müssen die Kollektive entsprechend angepasst werden, um mit dem vereinfachten Algorithmus die Randbedingungen zu realisieren.

In winLIFE FKM QUICKCHECK hingegen wird die Vereinfachung (konstantes  $R$  für gesamtes Kollektiv) nicht gemacht, sondern es werden die Spannungsverhältnisse der einzelnen Kollektivstufen für jede einzelne korrekt berücksichtigt. Die Definition der Überlastungsfälle erfolgt dabei in winLIFE FKM QUICKCHECK in der Weise, dass entsprechende Kollektive vorgegeben werden. Dieses Vorgehen ist unseres Erachtens eine bedeutete eine bessere Transparenz

#### 3.5.4.1. Einzel- oder Vergleichsmittelspannung (4.4.2.5)

---

Hinweis: s. FKM-Richtlinie Kap.4.3.2.5 Seite 101

---



## Nicht geschweißte Bauteile

Für Normal- und Schubspannungen gelten die Größen:

$$\sigma_{\min} \quad \sigma_{\max} \quad \sigma_a \quad \sigma_m$$

und

$$\tau_{\min} \quad \tau_{\max} \quad \tau_a \quad \tau_m$$

## Geschweißte Bauteile

$$\sigma_{\min,\perp} \dots \sigma_{\min,\parallel}, \dots, \text{ bzw. } \tau_{\min,\perp}, \dots, \dots$$

## Einzelmittelspannung

Alle Größen werden ergeben sich aus der Mittelspannung und der Amplitude

$$S_{\min} = S_m - S_a$$

$$S_{\max} = S_m + S_a$$

$$R_n = S_{\min} / S_{\max}$$

Es wird unterschieden bezüglich Einzelmittelspannung und Vergleichsmittelspannung

Vergleichsmittelspannungen werden bei dem typischen Fall 'Biegung oder Torsion verwendet, -> ( Vorrang der Einzelmittelspannung)

## Vergleichsmittelspannung

Im maschinenbautypischen Fall „Biegung und Torsion“ und in ähnlichen Fällen mit Normal- und Schubspannungen wird eine Vergleichsmittelspannung gebildet, die dann die Berechnung der Vergleichsspannungen  $\sigma_{\min,v}$   $\sigma_{\max,v}$  und des Spannungsverhältnisses  $R_v$  erlaubt. Für diese gilt dann:

$$\sigma_{\min,v} = \sigma_{m,v} - \sigma_a$$

$$\sigma_{\max,v} = \sigma_{m,v} + \sigma_a$$

$$R_v = \sigma_{\min,v} / \sigma_{\max,v}$$

Vergleichsmittelspannung für Normalspannung

$$\sigma_{m,v} = q \cdot \sigma_{m,v,NH} + (1-q) \cdot \sigma_{m,v,GH}$$

Gleichung 4.4.33.

mit

$$q = \frac{\sqrt{3} - (1/f_{w,\tau})}{\sqrt{3} - 1}$$

$$\sigma_{m,v,NH} = 1/2 (|\sigma_m| + \sqrt{\sigma_m^2 + 4\tau_m^2})$$

$$\sigma_{m,v,GH} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2}$$

q=Konstante

	Stahl Al-Knet	GJS	GJM Alu-Guss	GJL
$f_{w,\tau}$	0,577	0,65	0,785	1
q	0	0,264	0,544	1

$\sigma_m, \tau_m$  Einzelmittelspannungen

Für Schubspannung:

$$\tau_{m,v} = f_{w,\tau} \cdot \sigma_{m,v}$$

### Nichtgeschweißte Bauteile

Für nicht geschweißte Bauteile ist die Vergleichsmittelspannung nach Gleichung 4.4.33 nur für Werte

$$\sigma_m = \sigma_{m,x} + \sigma_{m,y} + \sigma_{m,z}$$

Gleichung 4.4.36

$$\tau_m = \tau_{m,yz} + \tau_{m,xz} + \tau_{m,xy}$$

$\sigma_{m,x}, \dots$  Einzelmittelspannungen Kap. 4.1.

Die Werte  $\sigma_{m,x}, \sigma_{m,y}, \sigma_{m,z}, \tau_{m,yz}, \tau_{m,xz}, \tau_{m,xy}$  sind mit Vorzeichen in Gl. 4.4.36 einzusetzen, da sich ihre Wirkungen addieren oder subtrahieren können.

### Geschweißte Bauteile

Für geschweißte Bauteile ist die Vergleichsmittelspannung nach Gl. 4.4.33 nur für Werte  $\sigma_{m,\perp} \geq 0$  und  $\sigma_{m,\parallel} \leq 0$  (oder umgekehrt) zu berechnen. Es gilt:

$$\sigma_m = \sigma_{m,\perp} \text{ oder } \sigma_m = \sigma_{m,\parallel}$$

$$\tau_m = \tau_m$$

$\sigma_{m,\perp}$  Einzelmittelspannungen

### **Vorrang der Einzelmittelspannung**

Sollte für eine einzelne Spannungsart die Vergleichsmittelspannung nach Gl. 4.4.33 kleiner sein als die Einzelmittelspannung ist für diese Spannungsart mit der Einzelmittelspannung zu rechnen.

Es gilt:  $\sigma_m = \sigma_{m,zd} + \sigma_{m,by} + \sigma_{m,bz}$  und  $\tau_m = \tau_{m,sy} + \tau_{m,sz} + \tau_{m,t}$

Die additive Überlagerung von  $\tau_{SK,sy}$  und  $\tau_{SK,sz}$  liegt immer auf der sicheren Seite, und gilt, wenn bei dünnwandigen Querschnitten die Schubspannungen infolge von  $Q_y$  und  $Q_z$  entlang des Profils ausgerichtet sind. Günstiger ist die quadratische Überlagerung.

### 3.5.5. Bauteil-Betriebsfestigkeit (4.4.3)

#### 3.5.5.1. Allgemeines (4.4.3.0)

**Bauteil-Betriebsfestigkeit** unter Berücksichtigung des Spannungskollektivs, der Kollektivform und der Bauteil-Wöhlerlinie

Einstufenkollektiv → Dauerfestigkeitsnachweis oder Zeitfestigkeitsnachweis

Mehrstufenkollektiv → Betriebsfestigkeitsnachweis oder Äquivalentspannungsamplitude führt zum Dauerfestigkeitsnachweis

#### 3.5.5.2. Nichtgeschweißte Bauteile (4.4.3.1)

$$\sigma_{BK} = K_{BK,\sigma} * \sigma_{AK} \quad \text{Gleichung 4.4.38}$$

$$\tau_{BK} = K_{BK,\tau} * \tau_{AKt}$$

$K_{BK,\sigma}$ ,  $K_{BK,\tau}$  Betriebsfestigkeitsfaktor für die jeweilige Spannungskomponente unter Berücksichtigung von Gl. 4.4.42

$\sigma_{AK}$   $\tau_{AKt}$  Bauteildauerfestigkeit

Gleichung 4.4.38 ist für jede Spannungskomponente am Nachweispunkt separat zu berechnen.

#### 3.5.5.3. Geschweißte Bauteile (4.4.3.2)

$$\sigma_{BK,\perp} = K_{BK,\perp} * \sigma_{AK,\perp} \quad \text{Gleichung 4.4.39}$$

$$\sigma_{BK,\parallel} = K_{BK,\parallel} * \sigma_{AK,\parallel}$$

$$\tau_{BK} = K_{BK,\tau} * \tau_{AK}$$

$K_{BK,\perp}$ , ..... Betriebsfestigkeitsfaktor unter Berücksichtigung von Gl. 4.4.42

$\sigma_{AK,\perp}$ , ..... Bauteildauerfestigkeit

#### 3.5.5.4. Maximale Amplitude der Bauteil-Betriebsfestigkeit (4.4.3.3)

Der ertragbare Wert der Amplitude der Betriebsfestigkeit  $\sigma_{BK}$  wird durch die statische Festigkeit  $\sigma_{SK}$  sowie durch die Bauteilfließgrenze eingeschränkt

### Nichtgeschweißte Bauteile

$$\sigma_{BK,max} = 0,75 * R_p * n_{pl}$$

$$\tau_{BK,max} = 0,75 * f_t * R_p * n_{pl}$$

## Geschweißte Bauteile

$$\sigma_{BK,max,\perp} = 0,75 * R_p * n_{pl} * \alpha_w * \rho_{WEZ}$$

$$\sigma_{BK,max,\parallel} = 0,75 * R_p * n_{pl} * \alpha_w * \rho_{WEZ}$$

$$\tau_{BK,max} = 0,75 * R_p * n_{pl} * \alpha_w * \rho_{WEZ}$$

$R_p$	Fließgrenze
$f_t$	Schubfestigkeitsfaktor
$n_p$	plastische Stützzahlen
$\alpha_w$	Schweißnahtfaktor
$\rho_{WEZ}$	Entfestigungsfaktor

## für jede Spannungskomponente gilt:

Falls  $\sigma_{BK} \geq \sigma_{BK,max}$  dann gilt:

$$\sigma_{BK} = \sigma_{BK,max} \quad \text{und} \quad K_{BK} = \sigma_{BK,max} / \sigma_{AK}$$

$K_{BK}$	Betriebsfestigkeitsfaktor
$\sigma_{BK}$	Bauteilbetriebsfestigkeit
$\sigma_{AK}$	Bauteil-Dauerfestigkeit

### 3.5.6. Bauteil-Wöhlerlinie (4.4.3.4)

#### Normalspannung

Bauteil	$N_{D,\sigma}$	$N_{D,II,\sigma}$	$k_{,\sigma}$	$k_{II,\sigma}$	$f_{II,\sigma}$
Stahl und Eisengußwerkstoff (WL Typ I)					
Nichtgeschweißt	$10^6$	-	5		
geschweißt	$5 * 10^6$	-	3		
Aluminiumwerkstoff und austenitischer Stahl (WL Typ II)					
Nichtgeschweißt	$10^6$	$10^8$	5	15	0,74
geschweißt	$5 * 10^6$		3		

#### Schubspannung

Bauteil	$N_{D,\tau}$	$N_{D,II,\tau}$	$k_{,\tau}$	$k_{II,\tau}$	$f_{II,\tau}$
Stahl und Eisengußwerkstoff (WL Typ I)					
Nichtgeschweißt	$10^6$	-	8	-	-
geschweißt	$10^8$	-	5	-	-
Aluminiumwerkstoff und austenitischer Stahl (WL Typ II)					
Nichtgeschweißt	$10^6$	$10^8$	8	25	0,83
geschweißt	$10^8$	-	5	-	-

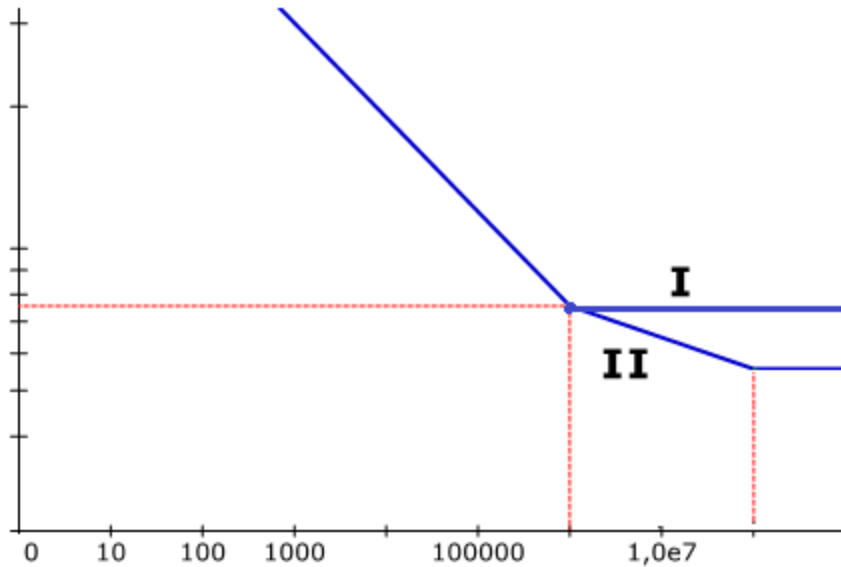


Bild 3-16: Unterscheidung der Wöhlerlinien-Typen

### 3.5.7. Betriebsfestigkeitsfaktor – Einstufenkollektiv (4.4.3.5.1)

#### Bauteil-Wöhlerlinie Typ I

$N < N_D$ Zeitfestigkeitsnachweis	$K_{BK} = \left(\frac{N_D}{N_{D,II}}\right)^{\frac{1}{k_{II}}}$
$N \geq N_D$ Dauerfestigkeitsnachweis	$K_{BK} = 1$

#### Bauteil-Wöhlerlinie Typ II

$N < N_D$ Zeitfestigkeitsnachweis	$K_{BK} = \left(\frac{N_D}{N}\right)^{\frac{1}{k_{II}}}$
$N_D < N < N_{D,II}$ Zeitfestigkeitsnachweis*	$K_{BK} = \left(\frac{N_D}{N}\right)^{\frac{1}{k}}$
$N = N_{D,II}$ Dauerfestigkeitsnachweis	$K_{BK} = 1$
$N \geq N_{D,II}$ Grenzspannungsamplitude *	$K_{BK} = \left(\frac{N_D}{N}\right)^{\frac{1}{k}}$

### 3.5.8. Betriebsfestigkeitsfaktor – Mehrstufenkollektiv (4.4.3.5.2)

Vorzugsweise nach Miner konsequent oder vereinfacht nach Miner elementar

Bauteil-Wöhlerlinie Typ I / II

$$K_{BK} = \left( \frac{A \cdot N_D \cdot D_m}{N} \right)^{\frac{1}{k}}$$

Bei Wöhlerlinientyp I, darf der Wert nicht kleiner 1 werden

Bei Wöhlerlinientyp II, darf der Wert nicht kleiner als \* berechnet werden (siehe Folie zuvor)

A = Abstand zwischen Lebensdauerlinie und Wöhlerlinie, entsprechend für Miner elementar oder Miner konsequent.

$D_m$  = effektive Minersumme

$$D_m = \text{MAX}(D_{m,\text{min}}; \text{MIN}(1; \frac{2}{\sqrt[4]{A}}))$$

Bild 3-17: Tabelle 2.4.4 entnommen aus FKM-Richtlinie		$D_{m,\text{min}}$
	Stahl, GS, Alu. <i>nicht geschweißt</i>	0,3
	<i>geschweißte Bauteile</i>	0,5
	GJS, GJM, GJL <i>nicht geschweißt</i>	1,0

A - Abstand Lebensdauerlinie - Wöhlerlinie

Miner elementar für Bauteil-Wöhlerlinie Typ I / II

$$A_{ele} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N} \left( \frac{S_{a,i}}{S_{a,1}} \right)^k}$$

Miner konsequent für Bauteil-Wöhlerlinie Typ I / II

Jeweils 2 verschiedene Iterative Verfahren -> siehe Richtlinie



---

## 3.6. Sicherheitsfaktoren (4.5)

### 3.6.1. Allgemeines

Die Sicherheitsfaktoren beziehen sich auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit der Festigkeitswerte von 97,5 %

$j_S$  = Lastfaktor, wird die Lastannahme als sicher angenommen so ist der Wert 1, andere Faktoren sind in Kapitel 5.7 beschrieben

Wert 1, andere Faktoren sind in Kapitel

### 3.6.2. Nichtgeschweißte Bauteile

#### 3.6.2.1. *Stahl- und Aluminium-Knetwerkstoff*

Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von Schadensfolgen und Inspektionsmöglichkeit.

Tabelle 4.5.1 aus FKM Richtlinie

$j_F$		Schadensfolgen		
		hoch	Mittel	niedrig
Regelmäßige Inspektion	nein	1,5	1,4	1,3
	ja	1,35	1,25	1,2

### 3.6.3. Eisen- und Aluminium Gußwerkstoff

Zusätzlich ist bei Gusswerkstoffen der Materialsicherheitsfaktor  $j_G$  zu berücksichtigen.

Tabelle 4.4.2 aus FKM Richtlinie: Materialsicherheitsfaktoren für nichtgeschweißte Bauteile

	$j_G$
Nicht zerstörungsfrei geprüfte Gussstücke	1,4
Zerstörungsfrei geprüfte Gussstücke	1,25
Premium Gussteile	1,0

### 3.6.4. Geschweißte Bauteile

Tabelle 4.5.3: Materialsicherheitsfaktoren für geschweißte Bauteile

j <sub>F</sub>		Schadensfolgen		
		hoch	Mittel	niedrig
Regelmäßige Inspektion	nein	1,4	1,25	1,15
	ja	1,2	1,1	1,0

### 3.6.5. Gesamtsicherheitsfaktor

$$j_D = j_S * j_F / K_{T,D}$$

für Gussteile

$$j_D = j_S * j_F * j_G / K_{T,D}$$

j <sub>S</sub>	Last-Sicherheitsfaktor
j <sub>F</sub>	Materialsicherheitsfaktor
j <sub>G</sub>	Gussfaktor
K <sub>T,D</sub>	Temperaturfaktor

## 3.7. Nachweis (4.6)

### 3.7.1. Allgemeines (4.6.0)

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen ist für jede einzelne Spannungskomponente nach Kap 4.6.1 durchzuführen.

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen ist für die zusammengesetzte Spannung nach Kap 4.6.2 durchzuführen.

Die Berechnung gilt für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile.

#### 3.7.1.1. Auslastungsgrad

Der Nachweis erfolgt mit Hilfe des zyklischen Auslastungsgrades, der wie folgt definiert ist:

- Vorhandene Spannungsamplitude  $\sigma_a$  dividiert durch
- zulässige Amplitude der Betriebsfestigkeit

muß für den Nachweispunkt erfolgen.

Die zulässige Amplitude der Bauteilbetriebsfestigkeit ist der Quotient aus:

- ertragbarer Amplitude der Bauteilbetriebsfestigkeit  $\sigma_{BK}$  und
- Gesamtsicherheitsfaktor  $j_D$

Alle Amplituden sind als positive Werte anzugeben, der Auslastungsgrad ist damit auch immer positiv.

### 3.7.1.2. Überlagerung

Eine Überlagerung ist notwendig, wenn mehrere Spannungskomponenten im Nachweispunkt wirken. Die angegebenen Gleichungen stellen empirische Interaktionsgleichungen dar, die im proportionalen Fall anwendbar, im synchronen Fall näherungsweise verwendbar sind. Im Falle sich drehender Hauptspannungen ist eine Anwendung unzulässig.

## 3.7.2. Einzelne Spannungsarten (4.6.1)

Zyklische Auslastungsgrade nichtgeschweißter Bauteile für Normalspannungen und Schubspannungen sind für alle Spannungskomponenten zu berechnen.

Der Nachweis ist erbracht, wenn alle geforderten Auslastungsgrade maximal 1 sind.

Einzelbelastungsgrade für einzelne Spannungsarten

$$a_{BK,\sigma} = \sigma_{a,zd/by/bz} / (\sigma_{BK,zd/by/bz} / j_D) \leq 1 \quad (\text{Gleichung 4.6.3})$$

$$a_{BK,\tau} = \tau_{a,1} / (\tau_{BK} / j_D) \leq 1$$

Bei geschweißten Bauteilen mit Normalspannungen senkrecht und parallel zur Schweißnaht sowie Schubspannungen:

$$a_{BK,\perp} = \sigma_{a,\perp,1} / (\sigma_{BK,\perp} / j_D) \leq 1$$

$$a_{BK,\parallel} = \sigma_{a,\parallel,1} / (\sigma_{BK,\parallel} / j_D) \leq 1 \quad (\text{Gleichung 4.6.4})$$

$$a_{BK,\tau} = \text{abs} (\tau_{a,1} / (\tau_{BK,\tau} / j_D)) \leq 1$$

$\sigma_{a,1}, \dots$  größte Spannungsamplitude je nach Spannungsart

$\sigma_{BK}, \dots$  zugehörige Bauteilbetriebsfestigkeit

$j_D$  Gesamtsicherheitsfaktor

## 3.7.3. zusammengesetzte Spannungsarten (4.6.2)

### 3.7.4. proportionale und synchrone Spannungen (4.6.2.1)

Der zyklische Auslastungsgrad für nicht geschweißte Bauteile ergibt sich als Summe des Auslastungsgrades nach der Normalspannungshypothese und der Gestaltänderungsenergiehypothese. Die Anteile ergeben sich je nach Duktilität durch die Konstante  $q$ .

$$a_{BK,\sigma} = q \cdot a_{NH} + (1-q) \cdot a_{GH} \leq 1 \quad (\text{Gleichung 4.6.5})$$

Tabelle 4.6.1: Werte von q in Abhängigkeit verschiedener Werkstoffe und Schubfestigkeitsfaktor  $f_{w,\tau}$

	Stahl Al-Knet	GJS	GJM Alu-Guss	GJL
$f_{w,\tau}$	0,577	0,65	0,785	1
q	0	0,264	0,544	1

$$q = \frac{\sqrt{3} - (1/f_{w,\tau})}{\sqrt{3} - 1} \quad (\text{Gleichung 4.6.12})$$

Der Zusammenhang zwischen q und  $f_{w,\tau}$  ist durch obige Gleichung gegeben:

Für den räumlichen Spannungszustand gilt:

$$a_{NH} = \text{MAX} (|a_{BK,\sigma 1}| + |a_{BK,\sigma 2}| + |a_{BK,\sigma 3}|) \quad (\text{Gleichung 4.6.6})$$

$$a_{GH} = \sqrt{\frac{1}{2} [(a_{BK,\sigma 1} - a_{BK,\sigma 2})^2 + (a_{BK,\sigma 2} - a_{BK,\sigma 3})^2 + (a_{BK,\sigma 3} - a_{BK,\sigma 1})^2]} \quad (\text{Gleichung 4.6.7})$$

Mit:

$$S_{a,1} = a_{BK,\sigma 1}$$

$$S_{a,2} = a_{BK,\sigma 2}$$

$$S_{a,3} = a_{BK,\sigma 3}$$

$$a_{BK,\sigma 1}, \dots \quad \text{zyklischer Auslastungsgrad}$$

(Gleichung 4.6.8)

Für ebene Spannungszustände gilt:

$$a_{NH} = 1/2 * (|s_{\alpha} + s_{\sigma y}| + \sqrt{(s_{\alpha} - s_{\sigma y})^2 + 4\tau_a^2}) \quad (\text{Gleichung 4.6.9})$$

$$a_{GH} = \sqrt{s_{ax}^2 + s_{ay}^2 - s_{ax} \cdot s_{ay} + \tau_a^2} \quad (\text{Gleichung 4.6.10})$$

Mit

$$S_{ax} = a_{BK,\sigma x}$$

$$S_{ay} = a_{BK,\sigma y} \quad (\text{Gleichung 4.6.11})$$

$$\tau_{az} = a_{BK,\tau}$$

$a_{BK,\sigma}$ , ... zyklischer Auslastungsgrad (Gl. 4.6.3)

### 3.7.5. Sonderfälle

#### 3.7.5.1. Nichtduktiler Aluminiumwerkstoff (A<6%)

q=0,5

#### 3.7.5.2. randschichtgehärtete Bauteile

nicht bei mechanischer Randschichtverfestigung

q=1

#### 3.7.5.3. geschweißte Bauteile

$$a_{BK,v} = 1/2 * \left( s_{\sigma\perp} + s_{\parallel} \left| \sqrt{(s_{\sigma\perp} - s_{\parallel})^2 + 4\tau_a^2} \right| \right) \leq 1$$

(Gleichung 4.6.13)

Mit

$$s_{a\perp} = a_{BK,\perp}$$

$$s_{a\parallel} = a_{BK,\parallel}$$

(Gleichung 4.6.14)

$$\tau_a = a_{BK,\tau}$$

$a_{BK,\perp}$ , ... zyklischer Auslastungsgrad

#### 3.7.5.4. Vorzeichenregel

Die zyklischen Auslastungsgrade der Spannungsarten sind mit den Vorzeichen der Amplituden im Nachweispunkt anzusetzen.

gleichsinnige Wirkung -> positive Vorzeichen

gegensinnige Wirkung -> unterschiedliche Vorzeichen

Wirken die Amplituden gleichsinnig, erhöht sich der Auslastungsgrad, treten entgegengesetzte Vorzeichen auf, dann reduziert sich der Auslastungsgrad.

### 3.7.6.örtliche Spannungen / zusammengesetzt nicht proportional

Zusammengesetzte Spannungsarten bei nicht proportionaler Spannung:

Ist Gegenstand der Forschung:

**Gleichzeitiges Auftreten der Maximalspannung:**

Addition der Teilkollektive in Spannungsrichtung

Für jede Belastung ist der Auslastungsgrad zu berechnen.

Addition aller Auslastungsgrade zu einem Gesamtauslastungsgrad

**Zeitversetztes Auftreten der Maximalspannung:**

Addition der Teilkollektive in Lastwechselrichtung -> Bemessungskollektiv

Berechnung des Auslastungsgrad

Zusammengesetzte Spannungsarten bei nicht proportionaler Spannung:

**Zeitlich korreliertes Auftreten der Maximalspannung:**

Vorgehen wie proportionalen und synchronen Verfahren, mangels besserer Kenntnisse

Ohne Vorkenntnisse und Erfahrungen ist das Vorgehen ‚Gleichzeitiges Auftreten der Maximalspannung‘ anzuwenden

**Vorgehensweise bei drehenden Hauptspannungen:**

Schnittebenenverfahren -> Auslastungsgrad in Abhängigkeit des Winkels.

---

## 3.8. Dauerfestigkeitsnachweis im allgemeinen Fall (nicht proportional, nicht synchron)

Der Nachweis nach der FKM-Richtlinie bezieht eine Vielzahl von Parametern mit in die Analyse ein, so dass er vergleichsweise aufwendig ist und auch viel Wissen des Benutzers erfordert. Für den Dauerfestigkeitsnachweis bietet winLIFE FKM QUICKCHECK daher eine Alternative an, die mit sehr wenigen Eingaben zu einem Ergebnis kommt und daher sehr einfach zu bedienen ist. Auch ist dieser Nachweis für nichtgeschweißte und geschweißte Bauteile verfügbar.

### 3.8.1. Motivation für den Dauerfestigkeitsnachweis

Viele Anwender der FEM wollen Aussagen über die „Lebensdauer“ machen. Sie haben aber oftmals kaum Informationen über das Belastungskollektiv, die Wöhlerkurven, Oberfläche, Isotropie, etc. Trotzdem möchten Sie zumindest eine vereinfachte Abschätzung haben, ob überhaupt Betriebsfestigkeitsprobleme zu erwarten sind. Für derartige Fragestellungen ist der Dauerfestigkeitsnachweis interessant. Gelingt es zu zeigen, dass unter Worst-Case Annahmen die Beanspruchungen mit einer ausreichenden Sicherheit unterhalb der Dauerfestigkeit liegen, dann ist dieses Ergebnis oftmals ausreichend und der aufwendigere Betriebsfestigkeitsnachweis kann entfallen.

Der Dauerfestigkeitsnachweis liefert kein Ergebnis für eine Lebensdauer, sondern nur eine Aussage darüber, ob und wie weit die Worst-Case Beanspruchung unterhalb der Dauerfestigkeit liegt. Ist der Dauerfestigkeitsnachweis nicht erfüllt, so muß der sehr viel aufwendigere Betriebsfestigkeitsnachweis erfolgen. Für den Betriebsfestigkeitsnachweis müssen dann insbesondere die Belastungen und auch ihre zeitliche Relation vorliegen.

### 3.8.2. Theorie des Nachweises der Sicherheit gegen Dauerfestigkeit

#### 3.8.2.1. *Proportionaler Fall*

Das Programmmodul winLIFE FKM QUICKCHECK stellt die Funktionalität für den Dauerfestigkeitsnachweis zur Verfügung. Es kann dabei mit wenigen Benutzeraktionen ein Ergebnis erhalten werden. Bei diesem Nachweis sind FEM-Berechnungen die Grundlage und für jede auf das Bauteil wirkende Last  $F_i$  (Kraft, Moment, Temperatur,  $i$ = Nummer des Lastfalls) muß eine statische FEM-Rechnung für deren Maximalwert (Oberlast  $F_{0i}$ ) vorliegen.

Bei jeder auf das Bauteil wirkenden Last wird lediglich

- die Mittellast und Amplitude oder
- eine konstante Last

berücksichtigt. Die Anzahl der Schwingspiele der Last geht nicht in die Berechnung ein. Die Spannungstensoren beliebiger Knoten – z.B. aller Knoten der Oberfläche - werden für die Analyse verwendet.

Zur Werkstoffbeschreibung wird nur die Dauerfestigkeit benötigt und deren Abhängigkeit von der Mittelspannung.

Für die Berechnung der Sicherheit gegen Dauerfestigkeit erfolgt eine Berechnung aller möglichen Kombinationen der Spannungstensoren, die superponiert werden. Der Ablauf ist im folgenden Bild dargestellt.

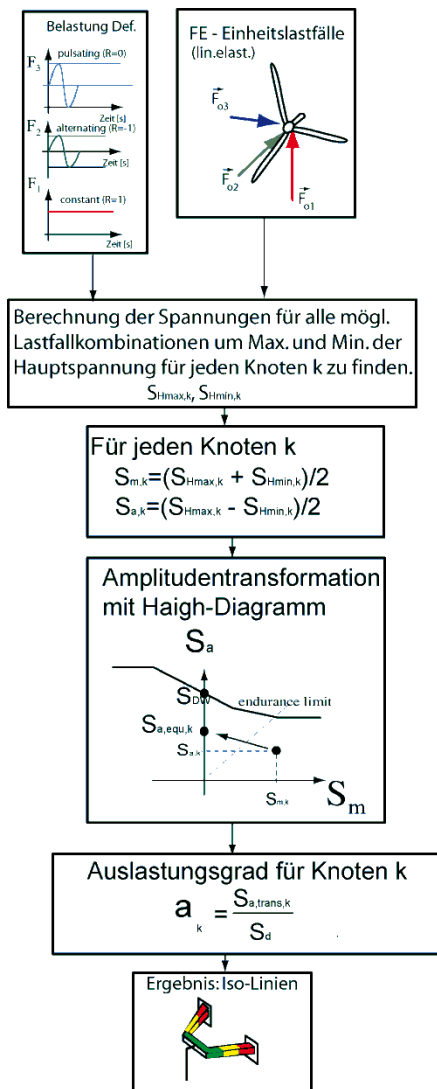


Bild 3-18: schematischer Ablauf bei dem Dauerfestigkeitsnachweis (Worst Case Szenario)

Aus den Ergebnissen aller Superpositionen wird die maximal und minimal auftretende Hauptspannung ermittelt. Daraus werden eine Hauptmittelspannung und eine Hauptspannungsamplitude berechnet, die mit Hilfe der Mittelspannungsempfindlichkeit  $M$  in eine äquivalente Amplitude  $S_{a,eqv}$  umgerechnet werden. Die Dauerfestigkeit  $S_{DW}$  der Wöhlerkurve wird durch die äquivalente Amplitude dividiert, was der Sicherheit gegen Dauerfestigkeit entspricht. Der Kehrwert der Sicherheit gegen Dauerfestigkeit ist der Auslastungsgrad  $a = S_{a,eqv}/S_{DW}$ .

Es muß für jeden einzelnen Lastfall  $i$  die maximale Belastung (=Oberlast)  $F_{oi}$  auf das FE-Modell aufgebracht werden. Als Ergebnis der FE-Rechnung werden die Spannungstensoren  $S_{ki,o}$  für jeden Knoten  $k$  erhalten. Die Unterlast  $F_{ui}$  ergibt sich aus dem Spannungsverhältnis  $R$  und  $F_{oi}$  gemäß folgender Formel:

$$F_{ui} = F_{oi} \cdot R_i$$

Der Spannungstensor für die Unterlast kann dann mit Hilfe der folgenden Formel einfach berechnet werden:

$$\underline{\underline{S_{ki,u}}} = \frac{F_{ui}}{F_{oi}} \underline{\underline{S_{ki,o}}} = \underline{\underline{R}} \underline{\underline{S_{ki,o}}}$$



Es werden nun die Permutationen  $p(i)$  aller denkbaren Lastkombinationen berechnet um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass sich die Spannungen ungünstigst überlagern können. Das Ergebnis berücksichtigt damit den ungünstigsten Fall und liegt damit auf der sicheren Seite. Um die ungünstigste Spannungsüberlagerung zu bestimmen, müssen die folgenden Lastfallkombination untersucht werden.

Art der Belastung	Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen	Variante 1	Variante 2
Wechselnd (R=-1)	2	+1	-1
Schwellend (R=0)	2	+1	0
Konstant (R=1)	1	+1	
Beliebiges R	2	+1	R

Ein einfaches Beispiel für eine reine Zug-Druckbelastung ist im folgenden Bild dargestellt und soll verdeutlichen, wie vorgegangen wird. Betrachten wir nur den Zustand auf der Oberfläche, so wird dort ein ebener Spannungszustand vorliegen. Diesen können wir im Mohrschen Kreis einfach darstellen und daraus auch die Hauptspannungen entnehmen.

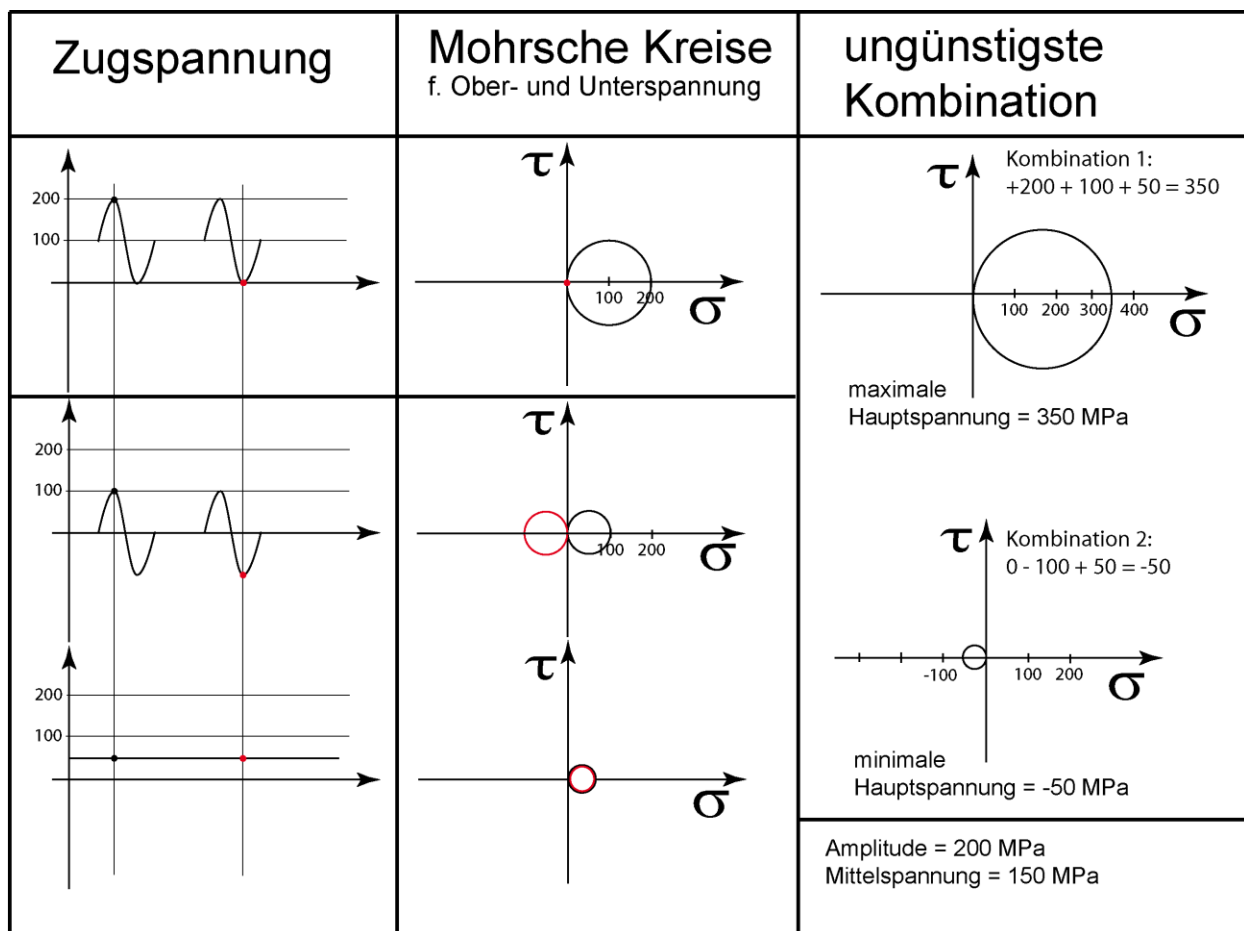


Bild 3-19: grafische Darstellung der Ergebnisse von drei Lastfallkombinationen für eine Worst-Case Analyse

An jedem Knoten gibt es für jeden Spannungstensor  $S_{ki,u}$  und  $S_{ki,o}$  je eine größte und kleinste Hauptspannung. Da der zeitliche Verlauf der Lasten  $i$  nicht bekannt ist, werden alle denkbaren Lastfallkombinationen untersucht und die größte und die kleinste Hauptspannung aller Kombinationen gesucht. Die Verwendung der Hauptspannung als schädigungsrelevante Größe ist zwar eine starke Vereinfachung, die jedoch für eine Abschätzung ausreichen sollte.

Aus der größten und kleinsten Hauptspannung  $S_{Hmax,k}$  und  $S_{Hmin,k}$  werden die Amplitude und die Mittelspannung nach folgenden Formeln bestimmt:

$$S_{m,k} = (S_{Hmax,k} + S_{Hmin,k})/2$$

$$S_{a,k} = (S_{Hmax,k} - S_{Hmin,k})/2$$

Aus Spannungsamplitude und Mittelspannung wird mit Hilfe der Amplitudentransformation eine äquivalente Wechsellastspannung  $S_{a,eq,k}$  berechnet. Die Dauerfestigkeit  $S_{DW}$  dividiert durch diese Wechsellastspannung stellt dann die Sicherheit gegen Dauerfestigkeit dar. Der Kehrwert der Sicherheit gegen Dauerfestigkeit ist der Auslastungsgrad  $a_k = S_{a,eq,k}/S_{DW}$ . Die Ergebnisse für die Sicherheit gegen Dauerfestigkeit und der Auslastungsgrad werden in die winLIFE 4.0 2018 Export-Datei geschrieben, die als Ergebnis auf dem Bildschirm oder als Ausdruck dargestellt werden kann.

Sollte der Auslastungsgrad  $< 1$  sein, so kann davon ausgegangen werden, dass keine Betriebsfestigkeitsrechnung notwendig ist.

Liegt der Auslastungsgrad in der Nähe von 1 oder gar darüber, so wird eine vertiefende Analyse durch einen Betriebsfestigkeitsnachweis nötig sein.

### **3.8.2.2. Multiaxialer Fall**

Es werden – wie auch beim proportionalen Fall - alle Lastfallkombinationen berechnet und für jede Kombination das Verfahren der kritischen Schnittebene angewendet. Es wird mit Hilfe der Normalspannungshypothese die maximale Spannungsschwingweite und zugehörige Mittelspannung in der Schnittebene bestimmt. Mit Hilfe der Amplitudentransformation wird daraus die äquivalente Amplitude ermittelt. Diese wird durch die Dauerfestigkeit geteilt, was dann zum Auslastungsgrad führt.

Diese Vorgehensweise wird dann angewendet, wenn das Datenformat der Plattenelemente verwendet wird. Dieses Datenformat gewährleistet, dass exakt ein ebener Spannungszustand vorliegt. Bei der Verwendung von OP2-Dateien wird immer das Format von Plattenelementen erzeugt und damit ein ebener Spannungszustand gewährleistet.

### **3.8.3. Dauerfestigkeitsnachweis für Nahtschweißverbindungen**

Nahtschweißverbindungen stellen oftmals den Ort des Bauteilversagens dar, so dass die Untersuchung von Schweißnähten eine häufig zu lösende Aufgabe darstellt. In winLIFE FKM QUICKCHECK ist diese Aufgabenstellung sehr effizient zu lösen, wenn

das Modell aus Plattenelementen aufgebaut ist,

alle Flächen unterschiedliche Properties aufweisen,

Die Schweißnähte nicht modelliert werden, sondern die Flächen stumpf aufeinanderstoßen.

Mit Hilfe des winLIFE-Makros in FEMAP werden alle Kontaktlinien der Properties bestimmt, da sich dort typischerweise die Schweißnähte befinden. Es wird nun für alle Elemente, die an eine derartige Kontaktlinie stoßen, der Elementenspannungstensor mit der Richtung der Schweißnahtnormalen multipliziert und damit der Vektor mit den Komponenten der Normalspannung senkrecht zur in der Plattenebene erhalten, der die Normalspannung und Schubspannung enthält.

Für die Dauerfestigkeitsanalyse wird nun die Normalspannung in der Weise verwendet, die es im Kapitel zuvor dargestellt wurde. Die Schubspannung wird ignoriert.

Das Ergebnis kann auf Grund der Vereinfachungen nur eine Abschätzung darstellen, mit der es aber in der Regel möglich ist, die kritischen Orte einer Struktur zu erfassen. Ist die Sicherheit gegen Dauerfestigkeit sehr hoch und liegt kein sicherheitskritisches Bauteil vor, wird man auf eine verfeinerte Berechnung verzichten können. Andernfalls wird man mit genaueren Lastdaten z.B. aus Messungen dem Strukturspannungskonzept oder R1-Konzept verfeinerte Analysen anstellen, wozu dann winLIFE BASIC und ggf. winLIFE MULTIAXIAL nötig sind.







# 4. Benutzeroberfläche QUICK CHECK

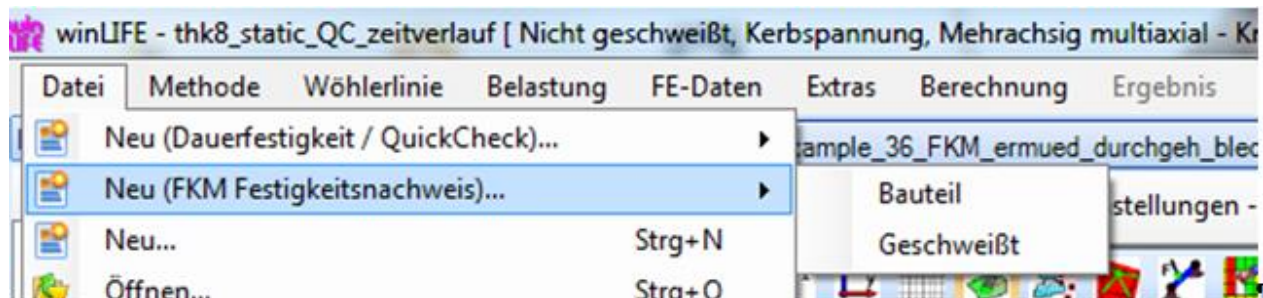


Bild 4-1: winLIFE Menü mit geöffnetem Datei-Dialog

Zur Erzeugung eines neuen Projektes muß der Benutzer den gewünschten Menüpunkt wählen.

Bezeichnung im Menü	Analyseverfahren	Bauteilart
<i>NEU (FKM Festigkeitsnachweis) / Bauteil</i>	Statischer Nachweis nach FKM Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM	Nicht geschweißt
<i>NEU (FKM Festigkeitsnachweis) /- Geschweißt</i>	Streng nach FKM: Für EINEN Nachweispunkt exakt Suchverfahren für alle Punkte der Oberfläche um den Nachweispunkt zu finden	Geschweißt
<i>NEU (Dauerfestigkeitsnachweis/QUICK CHECK) / Bauteil</i>	Dauerfestigkeitsnachweis nach Worst Case Analyse NICHT NACH FKM	nicht geschweißt
<i>NEU (Dauerfestigkeitsnachweis/QUICK CHECK) / Geschweißt</i>	<b>Für alle (Elemente oder Knoten) der Oberfläche</b>	Geschweißt
NEU	Für alle anderen winLIFE-Module. Für beliebig viele ( <b>Element oder Knoten</b> )	Geschweißt oder nicht geschweißt

Für die Nachweise nach FKM ist der Projekttyp QUICK CHECK verwendet. Nur wenn dieser in der Statuszeile (ganz oben) angezeigt wird, ist diese Berechnungsart möglich. QUICK CHECK benötigt sehr viel weniger Daten und hat eine stark vereinfachte Benutzerführung !

---

## 4.1. Datei

Die Wahlmöglichkeiten in diesem Menü sind eingeschränkt, es erscheint im Falle der Nichtverfügbarkeit der Funktion eine entsprechende Meldung.

### 4.1.1. Datei / Neu (Dauerfestigkeit / QUICK CHECK)

Man kann zwischen *Geschweißt* und *Bauteil* (nicht geschweißt) wählen.

Bei dieser Wahl wird ein neues QUICK CHECK Projekt mit der Voreinstellung Dauerfestigkeitsnachweis erzeugt. Es wird nur der Dauerfestigkeitsnachweis durchgeführt. Der Benutzer wird dann mit wenig Navigationsaufwand zu den Eingabemasken geführt. Dieses Vorgehen entspricht nicht der FKM-Richtlinie, ist aber am flexibelsten.

---

Obwohl winLIFE QUICKCHECK eigentlich nur für den Dauerfestigkeitsnachweis konzipiert ist, kann man auch den statischen Nachweis damit führen, indem man als Dauerfestigkeitswert die Streckgrenze angibt.

---

---

Es können **alle Knoten/Elemente** einer FE-Struktur un einem Schritt brechnet werden.

---

### 4.1.2. Datei / Neu (Festigkeitsnachweis FKM / QUICK CHECK)

Man kann zwischen *Geschweißt* und *Bauteil* (nicht geschweißt) wählen.

Bei dieser Wahl wird ein neues QUICK CHECK Projekt mit der Voreinstellung Festigkeitsnachweis FKM erzeugt. Der Benutzer wird dann mit wenig Navigationsaufwand zu den Eingabemasken geführt.

Es wird immer sowohl der statische Nachweis als auch der Ermüdungsfestigkeitsnachweis/Dauerfestigkeitsnachweis nach FKM durchgeführt.

---

Es kann der vom Benutzer zu wählende oder einzugebende **NACHWEISPUNKT** (Element, Knoten, manuelle einzugebende Spannung) streng nach FKM-Regeln berechnet werden.

Darüberhinaus bietet winLIFE die Möglichkeit, aus allen Punkten der Oberfläche den kritischen zu finden, indem die vom Benutzer eingegebenen Daten für den Nachweispunkt auf alle Punkte der Oberfläche angewendet werden. Diese in der FKM-Richtlinie nicht vorgesehene Möglichkeit ist – obwohl nur als Näherung geeignet - sehr hilfreich, da bei komplexen Systemem das Auffinden des Nachweispunktes nicht einfach ist.

---



### **4.1.3.Datei / Kopieren in normales Projekt**

Ein QUICK CHECK Projekt erlaubt nur eine stark vereinfachte Berechnung. Wenn der Wunsch besteht, ein derart vereinfachtes Projekt in eine normales Projekt umzuwandeln, so kann mit diesem Menüpunkt eine Projektkopie erstellt werden, in der die gesamten in QUICK CHECK erzeugten Daten vorhanden sind, so dass darauf aufbauend ein normales Projekt bearbeitet werden kann.

---

## **4.2. Wöhlerlinie**

Unter diesem Menüpunkt werden alle Materialdaten und teilweise Bauteildaten – auch für den statischen Nachweis – erfasst. Der statische Nachweis wird immer berechnet.

### **4.2.1.Wöhlerlinie Neu**

Die Eingabmasken für nicht geschweißt und geschweißt unterscheiden sich.

Alle Felder sind mit Daten vorbelegt, um die Datenstruktur anzuzeigen. Diese Daten sind durch die Daten des Benutzers zu überschreiben.

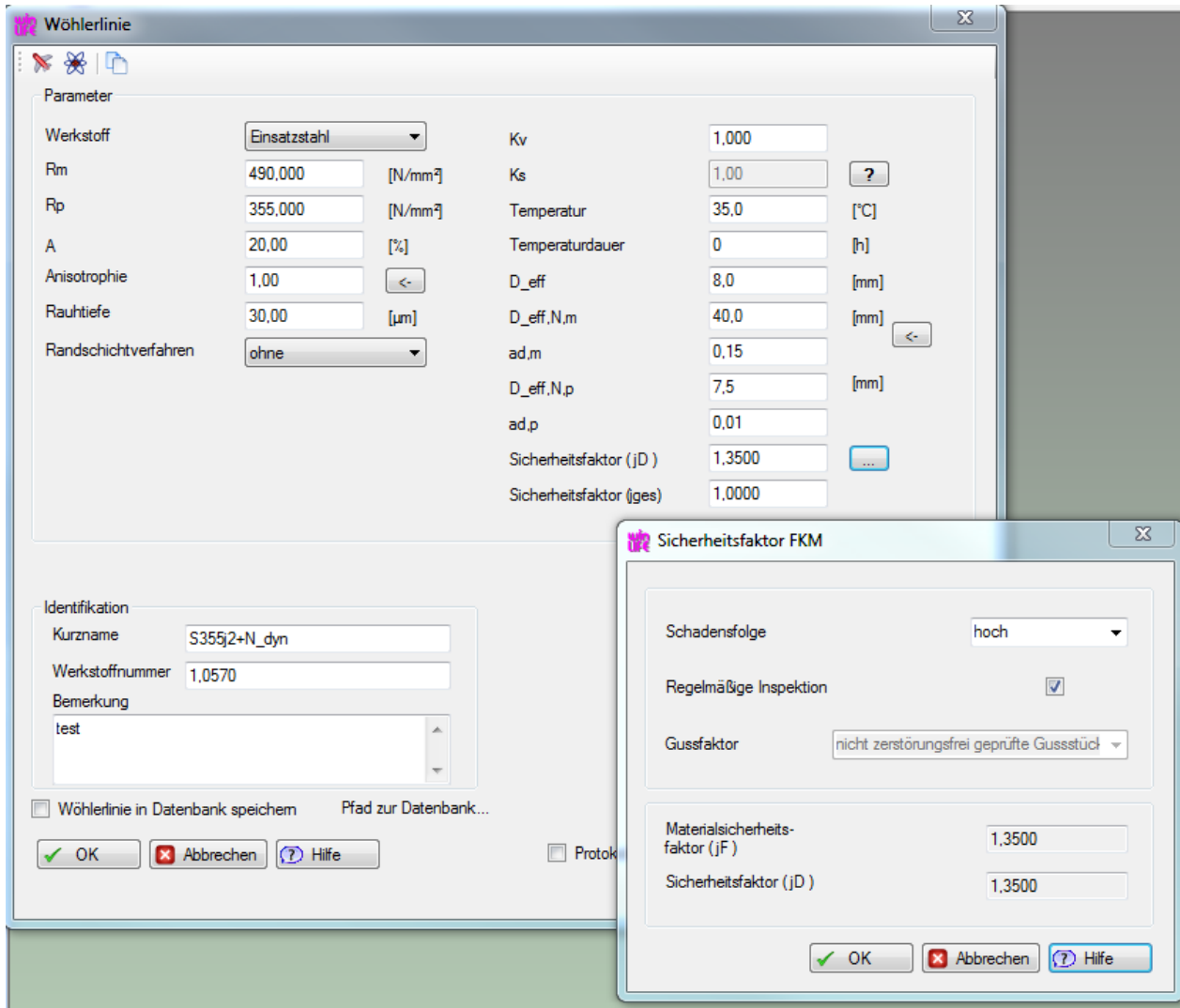


Bild 4-2: Eingabemaske zur Erzeugung der Lebensdauerdaten (Wöhlerlinie) und der statischen auf das Bauteil bezogenen (Größeneinfluss) Festigkeitswerte

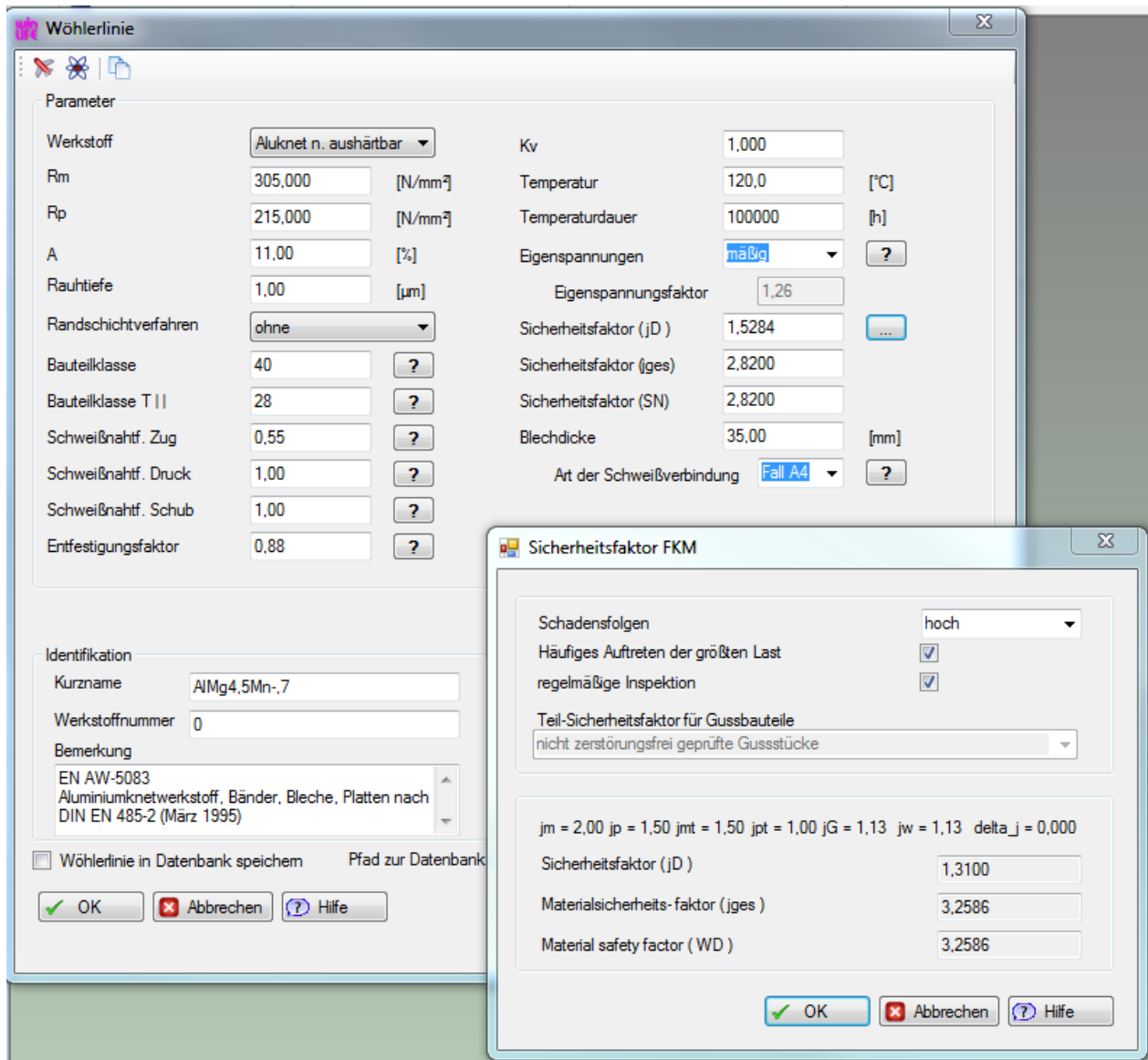


Bild 4-3: Eingabemaske zur Erzeugung der Lebensdauerdaten (Wöhlerlinie) für geschweißte Bauteile

#### 4.2.2. Wöhlerlinie Laden

Es wird eine Wöhlerliniendatenbank mit den Daten des Benutzers und mit Beispieldaten von winLIFE angezeigt, aus der der Benutzer einen Datensatz auswählen kann.

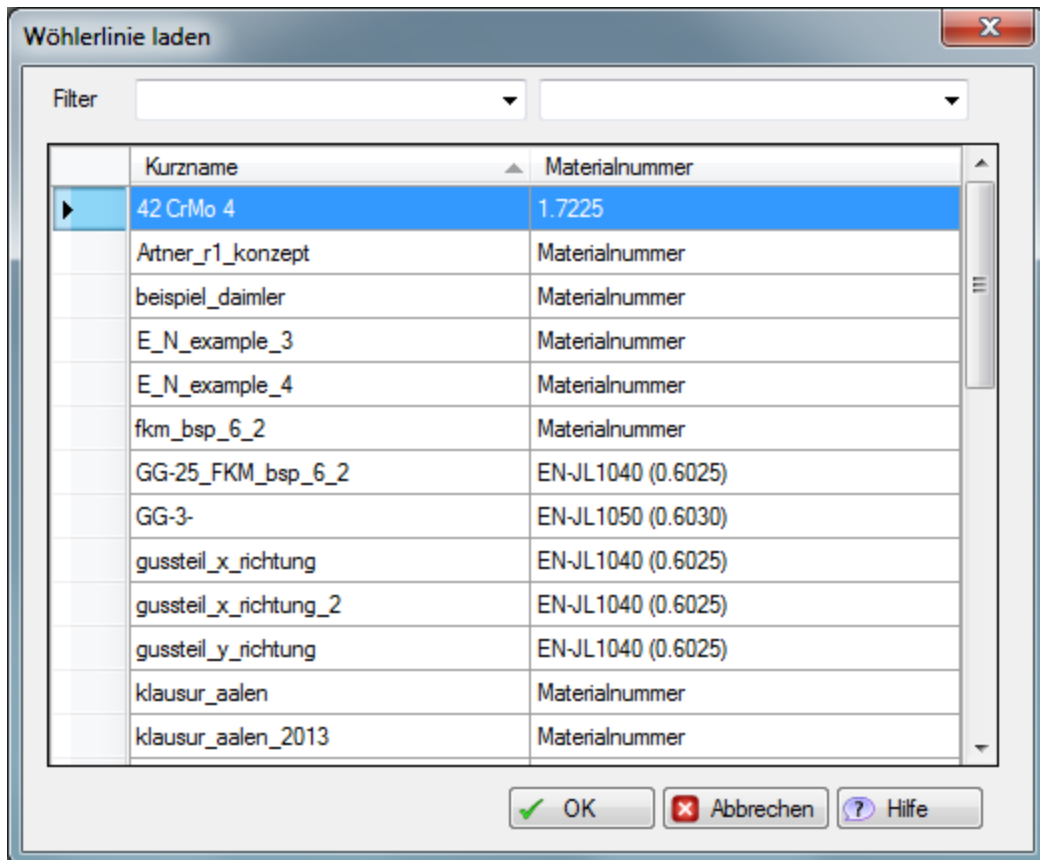


Bild 4-4: Auswahlmaske zum Laden einer Wöhlerlinie aus der Benutzerdatenbank

### 4.2.3. Wöhlerlinie / Laden FKM

Es wird die FKM-Datenbank angezeigt, aus der der Benutzer einen Werkstoff auswählen kann.

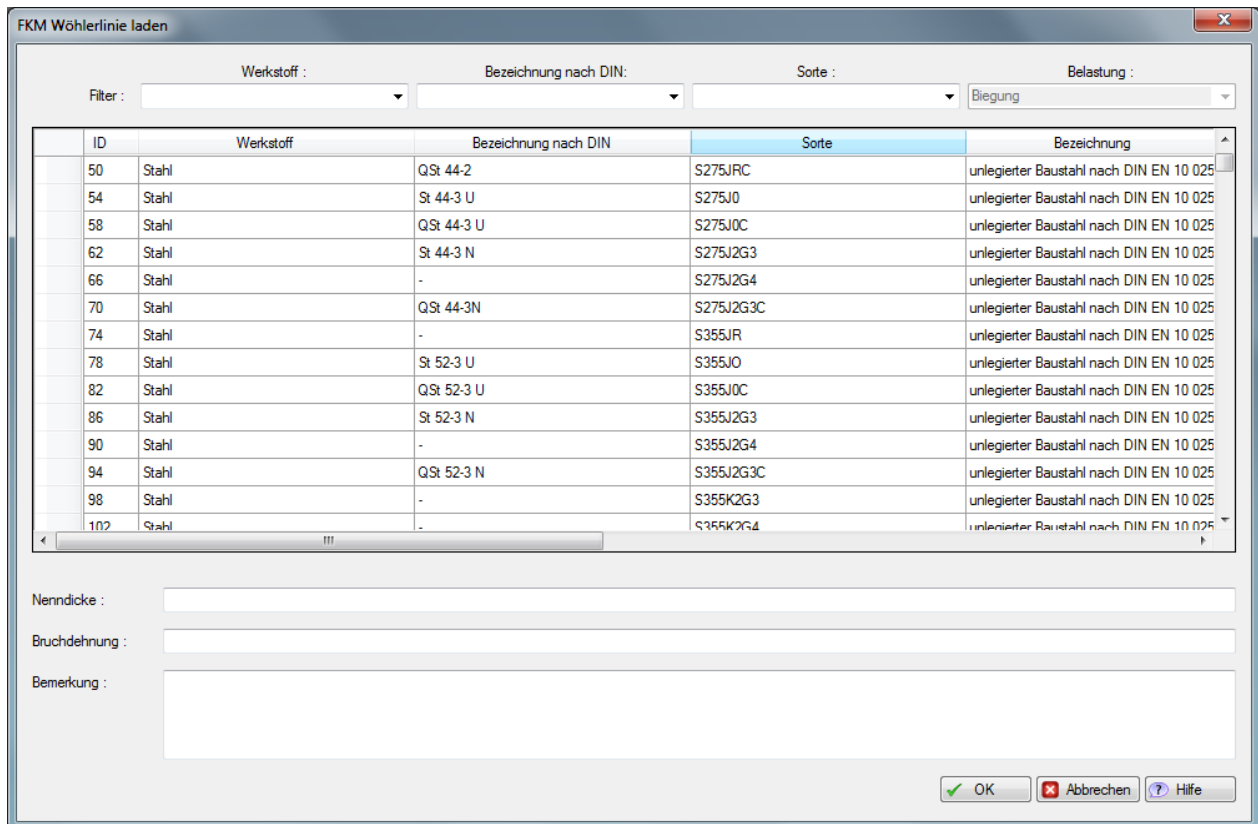


Bild 4-5: Auswahlmaske zum Laden einer Wöhlerlinie aus der FKM-Datenbank

#### 4.2.4. Wöhlerlinie / Editieren

Ein gewählt Wöhlerlinie wird in der Eingabemaske angezeigt und Werte können eingegeben und verändert werden. Es wird nur eine Eingabemaske mit Werten angezeigt, die entsprechend der FKM-Richtlinie veränderbar sind.

#### 4.2.5. Wöhlerlinie / Editieren professionell

Oftmals besteht auch bei statischem oder Dauerfestigkeitsnachweis der Wunsch, die erweiterten Möglichkeiten des Wöhlerliniengenerators zu nutzen. In diesem Fall muß

##### *Wöhlerlinie / Editieren professionell*

gewählt werden. An beachte, dass nun Änderungen und Eingaben möglich sind, die nicht mehr der FKM-Richtlinie für den statischen Nachweise oder dem Dauerfestigkeitsnachweis entsprechen müssen.

#### 4.2.6. Wöhlerlinie / Wöhlerlinie

Die gewählte Wöhlerlinie wird angezeigt.

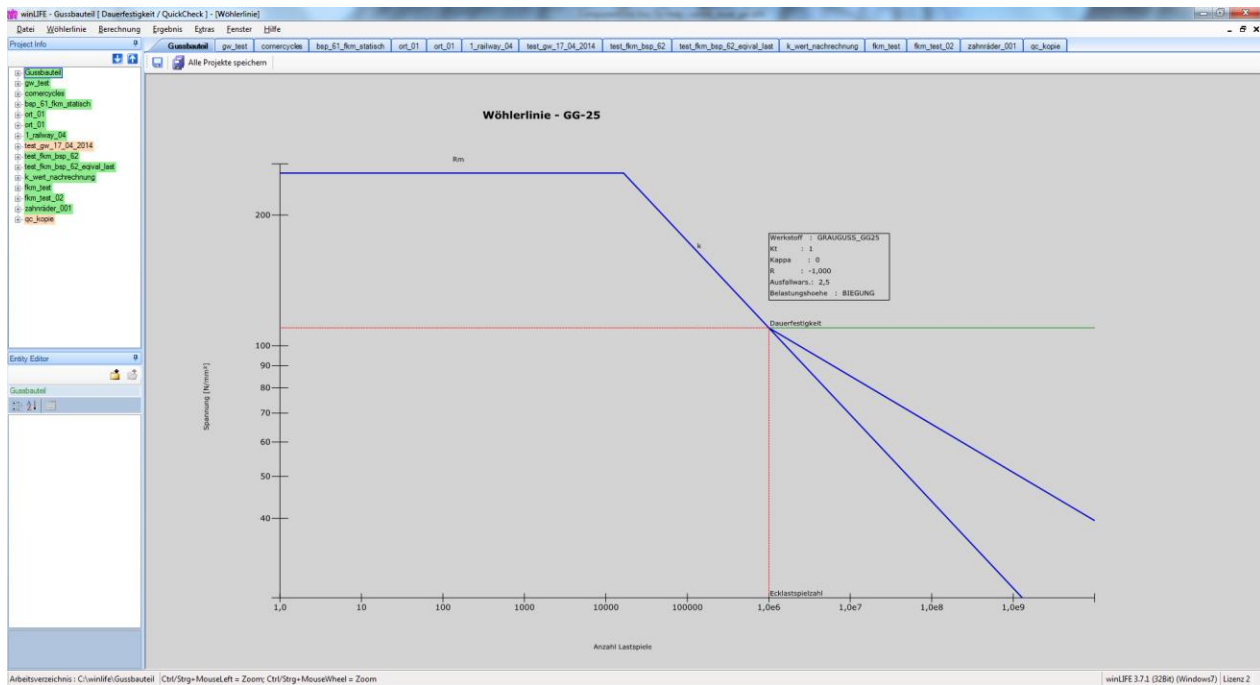


Bild 4-6: Grafische Darstellung der Wöhlerlinie

## 4.2.7. Wöhlerlinie / Haigh FKM-Diagramm

Das Haigh-Diagramm der gewählten Materialdaten wird angezeigt.

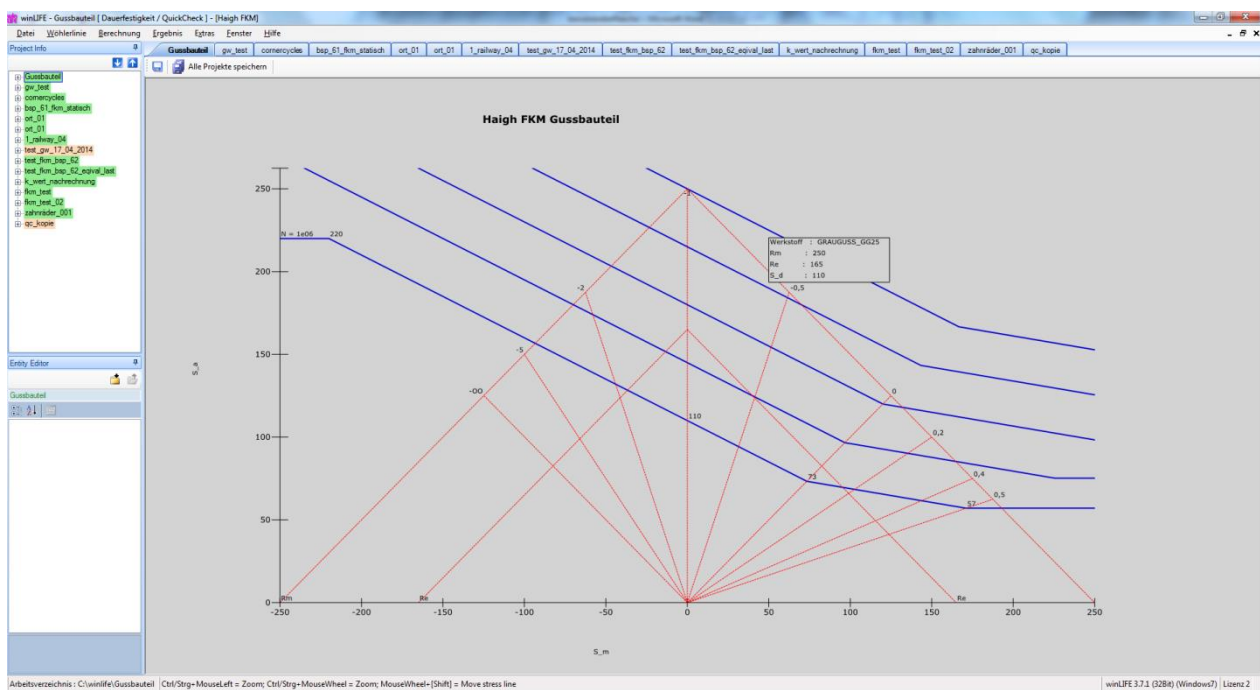


Bild 4-7: Haigh-Diagramm mit Linien gleicher Lebensdauer (Durch Drehen des Mauseisens kann eine Lebensdauerlinie interaktiv verschoben werden.)

## 4.2.8. Wählerlinie / Löschen in der Datenbank

Es können aus der Datenbank des Benutzers einzelne Datensatz gelöscht werden.

## 4.3. Berechnung

Unter diesem Menüpunkt erfolgt die Berechnung. Dazu sind die Spannungen einzugeben oder aber die Spannungstensoren können automatisch aus der FE-Software übernommen werden, wenn der VIEWER4WINLIFE lizenziert ist oder aber geeignete LST-Dateien vom Benutzer erzeugt wurden..

Egal ob die Daten aus einem FE-Modell stammen oder aber manuell eingegeben werden, sie haben in jedem Fall dieselbe Struktur, so dass FE-Daten einfach übernommen werden können.

Entsprechend der verschiedenen Elementtypen (Solids, Plates) ist auch das Datenformat unterschiedlich. Um alle Varianten von Elementtypen/Knotenspannungen eingeben zu können, kann der Benutzer das Datenformat interaktiv verändern.

Index	FE Ergebnis Datei	FE Spannungsgradient	Multiplikator
1	bsp_61_spannungen.LST		1
2			1,0
3			1,0
4			1,0
5			1,0
6			1,0
7			1,0

Pfad : \_\_\_\_\_

Konstruktionskennwerte

Knotennummer  plastische Formzahl Kp  Quick Check

stress gradient

aus FE file

aus Kerbradius r

manuelle Eingabe

K<sup>~</sup> aus FKM Tabelle

K<sup>~</sup>

K<sup>~</sup> (K(def, Kerbradius(G), n(G)G)

K<sup>~</sup> (K(def, Kerbradius r, n(G))

Spannungsgradient G

G<sub>x</sub>  Kerbradius r

G<sub>y</sub>  r<sub>x</sub>

G<sub>z</sub>  r<sub>y</sub>

r<sub>z</sub>

Lastverhältnis

konstant

R

R

R

Berechnungsverfahren

Dauerfestigkeit

N<sub>quer\_x</sub>

N<sub>quer\_y</sub>

N<sub>quer\_z</sub>

Berechnen OK Abbrechen Hilfe

Bild 4-8: Eingabemaske für die Definition der einzelnen Belastungsfälle

Klickt man auf den EDIT-Button, so öffnet sich folgendes weitere Fenster, das die Daten anzeigt bzw. deren Eingabe ermöglicht.

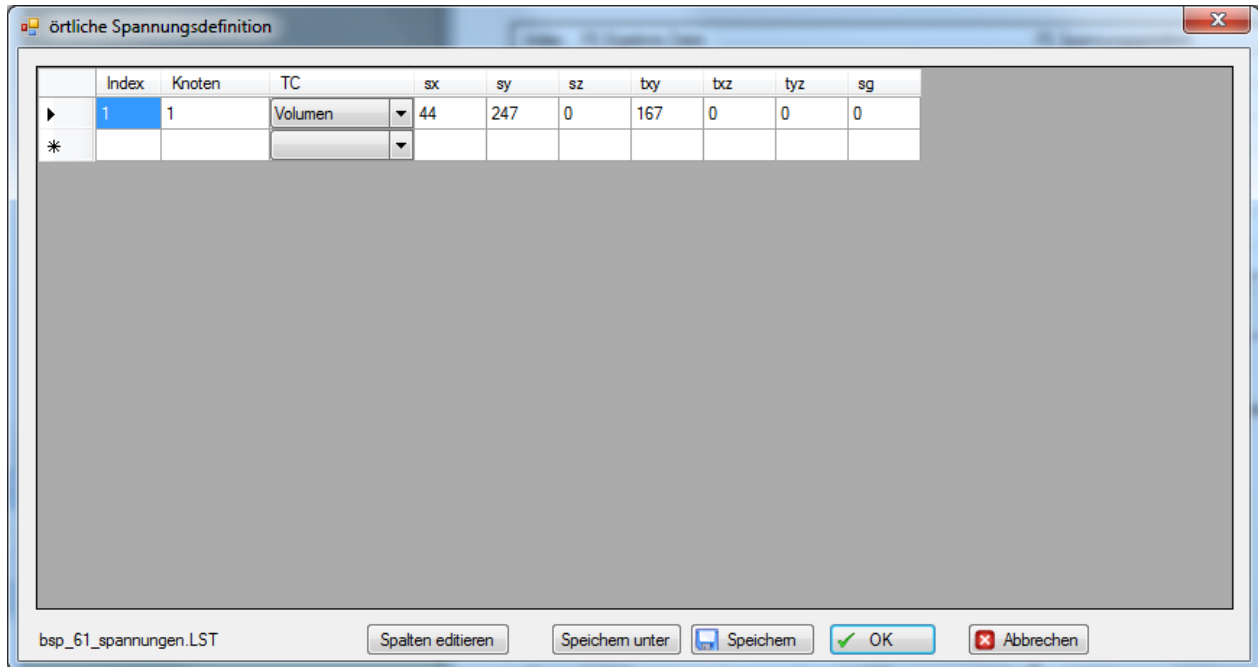


Bild 4-9: manuelle Eingabe der Komponenten des Spannungstensors.

Die übrigen Eingabefelder sind selbst erklärend.

Wird der Button **Berechnen** angeklickt, so erfolgt die Berechnung.

Das Ergebnis wird sofort auf dem Bildschirm in folgender Weise dargestellt. Die Eingabewerte, Zwischenwerte nach FKM und die Ergebnisse und schließlich auch der Hinweis, dass der Nachweis erbracht wurde, wird dargestellt und kann als Dokumentation verwendet werden.

```

Werkstoffkennwerte
  Rm: 8.95422E+02 Kdm: 8.95422E-01 KA: 1.00000E+00 RmN: 1.00000E+03 (3.2.1)
  Rp: 6.72407E+02 Kdp: 8.40509E-01 KA: 1.00000E+00 RpN: 8.00000E+02
Spannungen aus der Summe der Lastfälle
  sx: 4.40000E+01 sy: 2.47000E+02 sz: 0.00000E+00
  txy: 1.67000E+02 tyz: 0.00000E+00 txz: 0.00000E+00

Statischer Festigkeitsnachweis für den Knoten 1
Temperaturfaktor
  KI,m = KI,p: 1,00000E+00
Hauptspannungen
  h1: 3.40926E+02 h2: 0.00000E+00 h3: -4.99258E+01
hydrostatische Spannung sigma_H
  sigma_H: 9.70000E+01 (3.1.11)
Duktilitätsfaktor q, Festigkeitsfaktor f_sigma, Gussfaktor KNL
  q: 0.00000E+00 f_sigma: 1.00000E+00 KNL: 1.00000E+00 Zug
  q: 0.00000E+00 f_sigma: 1.00000E+00 KNL: 1.00000E+00 Druck
Vergleichsspannung
  sigma_v: 3.68435E+02 (3.1.4)
Mehrachsigkeit
  h: 2.63276E-01 sigma_H: 9.70000E+01 sigma_GH: 3.68435E+02 (3.1.10)
plastische Stützzahl - npl
  eps_ref: 1.10000E-01 A: 1.10000E+01 E: 2.10000E+05 Kp: 1.95000E+00 (3.3.4)
  eps_extr: 1.10000E-01 eps_0: 5.00000E+00 (3.3.3)
  npl: 1.95000E+00 (3.3.2)
Bauteilfestigkeit - sigma_SK
  sigma_SK: 1.31119E+03 (3.4.1)
Vergleichsauslastungsgrad - aSK
  aSK: 3.93388E-01 sigma_v: 3.68435E+02 sigma_SK: 1.31119E+03 jges: 1.40000E+00 (3.6.1)
  max. aSK: 3.93388E-01
Der statische Festigkeitsnachweis wurde erbracht.

```



Bild 4-10: Ausgabefenster mit Kurzfassung der Ergebnisse des statischen Nachweises

```

Ermuedungsfestigkeitsnachweis

Bauteil-Normwerte
4.2.1      sigma_Wzd: 4.02940E+02 fW,sigma: 4.50000E-01 Rm: 8.95422E+02
Temperaturfaktor KT,D
4.2.4      KT,D: 1.00000E+00

Spannungsart: Sigma 1
Stuetzzahlen nach Stielers - Normalspannung
4.3.7      n_sigma: 1.00000E+00 G_sigma: 0.00000E+00 Rm: 8.95422E+02 aG: 5.00000E-01 bG: 2.70000E+03
Schaeztwert der Kerbwirkungszahl
4.3.2      Kfs_sigma: 2.00000E+00 Kt_sigma: 1.00000E+00 n_sigma: 1.00000E+00
Rauheitsfaktor
4.3.21     KR_sigma: 8.56780E-01 aR_sigma: 2.20000E-01 r_t: 1.00000E+01 Rm: 8.95422E+02 Rm,N,min: 4.00000E+02
Konstruktionsfaktoren
4.3.1      KWK_sigma: 1.08358E+00 Kf~: 2.00000E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.00000E+00
Bauteil-Wechselfestigkeit
4.4.1      sigma_WK: 3.71860E+02 sigma_Wzd: 4.02940E+02 KWK_sigma: 1.08358E+00
Mittelspannungsempfindlichkeit
4.4.5      M_sigma: 2.13398E-01 aM: 3.50000E-01 bM:-1.00000E-01
Mittelspannungsfaktor
4.4.8 - 4.4.12 KAK_sigma: 7.27506E-01 R: 1.00000E+00 sm/sa: Infinity
Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit
4.4.4      sigma_AK: 2.70531E+02
ertragbare Nennwerte der Amplitude
4.4.38     sigma_BK: 2.70531E+02 KBK_sigma: 1.00000E+00
Maximalwert der Amplitude
4.4.40     sigma_BKmax: 8.73960E+02
Nachweis - einzelne Spannungsarten
4.6.3      aBK_sigma1: 0.00000E+00 sa: 0.00000E+00 jD: 1.25000E+00 sigma_BK: 2.70531E+02

Spannungsart: Sigma 2
Stuetzzahlen nach Stielers - Normalspannung
4.3.7      n_sigma: 1.00000E+00 G_sigma: 0.00000E+00 Rm: 8.95422E+02 aG: 5.00000E-01 bG: 2.70000E+03
Schaeztwert der Kerbwirkungszahl
4.3.2      Kfs_sigma: 2.00000E+00 Kt_sigma: 1.00000E+00 n_sigma: 1.00000E+00
Rauheitsfaktor
4.3.21     KR_sigma: 8.56780E-01 aR_sigma: 2.20000E-01 r_t: 1.00000E+01 Rm: 8.95422E+02 Rm,N,min: 4.00000E+02
Konstruktionsfaktoren
4.3.1      KWK_sigma: 1.08358E+00 Kf~: 2.00000E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.00000E+00
Bauteil-Wechselfestigkeit
4.4.1      sigma_WK: 3.71860E+02 sigma_Wzd: 4.02940E+02 KWK_sigma: 1.08358E+00
Mittelspannungsempfindlichkeit
4.4.5      M_sigma: 2.13398E-01 aM: 3.50000E-01 bM:-1.00000E-01
Mittelspannungsfaktor
4.4.8 - 4.4.12 KAK_sigma: 7.27506E-01 R: NaN sm/sa: NaN
Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit
4.4.4      sigma_AK: 2.70531E+02
ertragbare Nennwerte der Amplitude
4.4.38     sigma_BK: 2.70531E+02 KBK_sigma: 1.00000E+00
Maximalwert der Amplitude
4.4.40     sigma_BKmax: 8.73960E+02
Nachweis - einzelne Spannungsarten
4.6.3      aBK_sigma2: 0.00000E+00 sa: 0.00000E+00 jD: 1.25000E+00 sigma_BK: 2.70531E+02

Spannungsart: Sigma 3
Stuetzzahlen nach Stielers - Normalspannung
4.3.7      n_sigma: 1.00000E+00 G_sigma: 0.00000E+00 Rm: 8.95422E+02 aG: 5.00000E-01 bG: 2.70000E+03
Schaeztwert der Kerbwirkungszahl
4.3.2      Kfs_sigma: 2.00000E+00 Kt_sigma: 1.00000E+00 n_sigma: 1.00000E+00
Rauheitsfaktor
4.3.21     KR_sigma: 8.56780E-01 aR_sigma: 2.20000E-01 r_t: 1.00000E+01 Rm: 8.95422E+02 Rm,N,min: 4.00000E+02
Konstruktionsfaktoren
4.3.1      KWK_sigma: 1.08358E+00 Kf~: 2.00000E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.00000E+00
Bauteil-Wechselfestigkeit
4.4.1      sigma_WK: 3.71860E+02 sigma_Wzd: 4.02940E+02 KWK_sigma: 1.08358E+00
Mittelspannungsempfindlichkeit
4.4.5      M_sigma: 2.13398E-01 aM: 3.50000E-01 bM:-1.00000E-01
Mittelspannungsfaktor
4.4.8 - 4.4.12 KAK_sigma: 7.27506E-01 R: 1.00000E+00 sm/sa: -Infinity
Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit
4.4.4      sigma_AK: 2.70531E+02
ertragbare Nennwerte der Amplitude
4.4.38     sigma_BK: 2.70531E+02 KBK_sigma: 1.00000E+00
Maximalwert der Amplitude
4.4.40     sigma_BKmax: 8.73960E+02
Nachweis - einzelne Spannungsarten
4.6.3      aBK_sigma3: 0.00000E+00 sa: 0.00000E+00 jD: 1.25000E+00 sigma_BK: 2.70531E+02

Nachweis - zusammengesetzte Spannungsarten
4.6.5      aBK_sigma_v: 0.00000E+00 aNH: 0.00000E+00 aGH: 0.00000E+00 q: 0.00000E+00

Der Ermuedungsfestigkeitsnachweis wurde erbracht.
    
```

Bild 4-11: Ausgabefenster mit Kurzfassung der Ergebnisse des Ermüdungsfestigkeitsnachweises

### **4.3.1. Ergebnis / Protokoll**

Unter diesem Menüpunkt kann das bereits im Kapitel zuvor beschriebene Ergebnisblatt nochmals dargestellt werden.

### **4.3.2. Ergebnis / Viewer**

Unter diesem Menüpunkt werden – wenn ein FE-Modell aus Ausgangspunkt verwendet wurde - die Auslastungsgrade über der Struktur visualisiert.

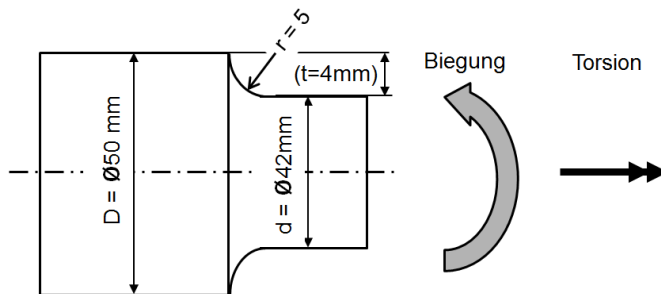




# 5. Beispiel 28 / FKM Beispiel Wellenabsatz

## 5.1. Aufgabenstellung

Der Wellenabsatz aus der FKM Richtlinie, Kapitel 6.1, soll hier mit dem winLIFE FKM QUICKCHECK / FKM nachgerechnet werden. Die untere Abbildung zeigt die Geometrie der Welle und die wirkenden Lasten Biegung und Torsion.



Zeichnung des Wellenabsatzes mit Belastung

## 5.2. Materialangabe und örtliche Spannungen

Die Welle besteht aus dem Werkstoff 41 Cr 4. Es handelt sich um einen Vergütungsstahl und der Werkstoff liegt im vergüteten Zustand vor.

Für den Nachweispunkt sind die folgenden Spannungen angegeben (vgl. FKM-Richtlinie Kapitel 6.1.4):

$$\sigma_{a,x} = 45\text{MPa} \quad \sigma_{m,x} = 0\text{MPa}$$

$$\sigma_{a,y} = 247\text{MPa} \quad \sigma_{m,y} = 0\text{MPa}$$

$$\tau_{a,xy} = 103\text{MPa} \quad \tau_{m,xy} = 64\text{MPa}$$

Für den Festigkeitsnachweis nach FKM in winLIFE 4.0 2018 werden örtliche Spannungen verwendet.

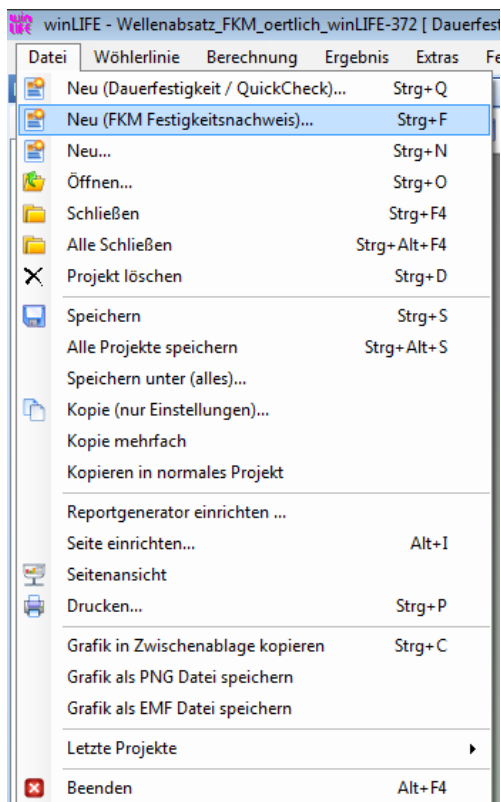
---

## 5.3. Projektaufbau in winLIFE, Modul QUICK CHECK / FKM

In winLIFE FKM QUICKCHECK erfolgt nun die Projektdefinition. Dazu wird gewählt:

Menü *Datei / Neu (FKM Festigkeitsnachweis)...*

Das folgende Fenster stellt die Befehlsfolge dar:



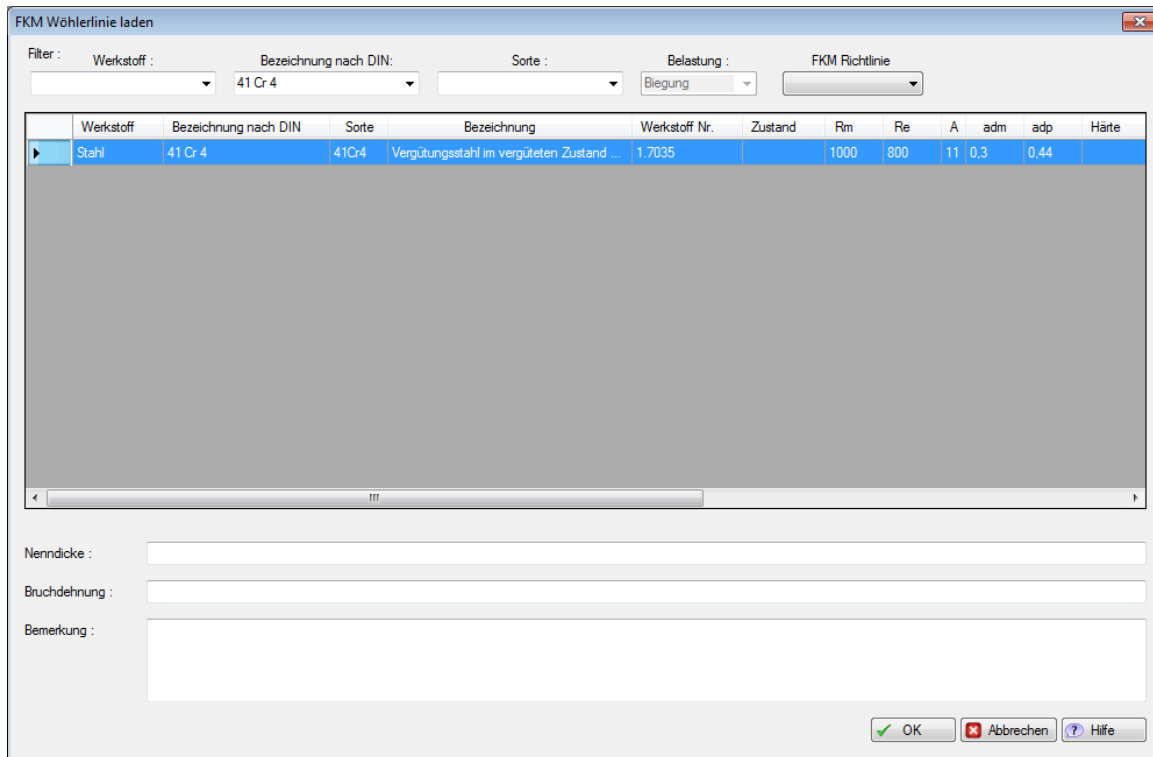
### Wahl des Festigkeitsnachweises in winLIFE

Ein Dateiname für das winLIFE FKM QUICKCHECK Projekt wird gewählt, z.B. eignet sich: *Wellenabsatz\_FKM.wlf*.

Die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs wird im Menü *Wöhlerlinie* festgelegt. Der Werkstoff 41 Cr 4 im vergüteten Zustand liegt in der winLIFE 4.0 2018 FKM Datenbank vor und kann gewählt werden.

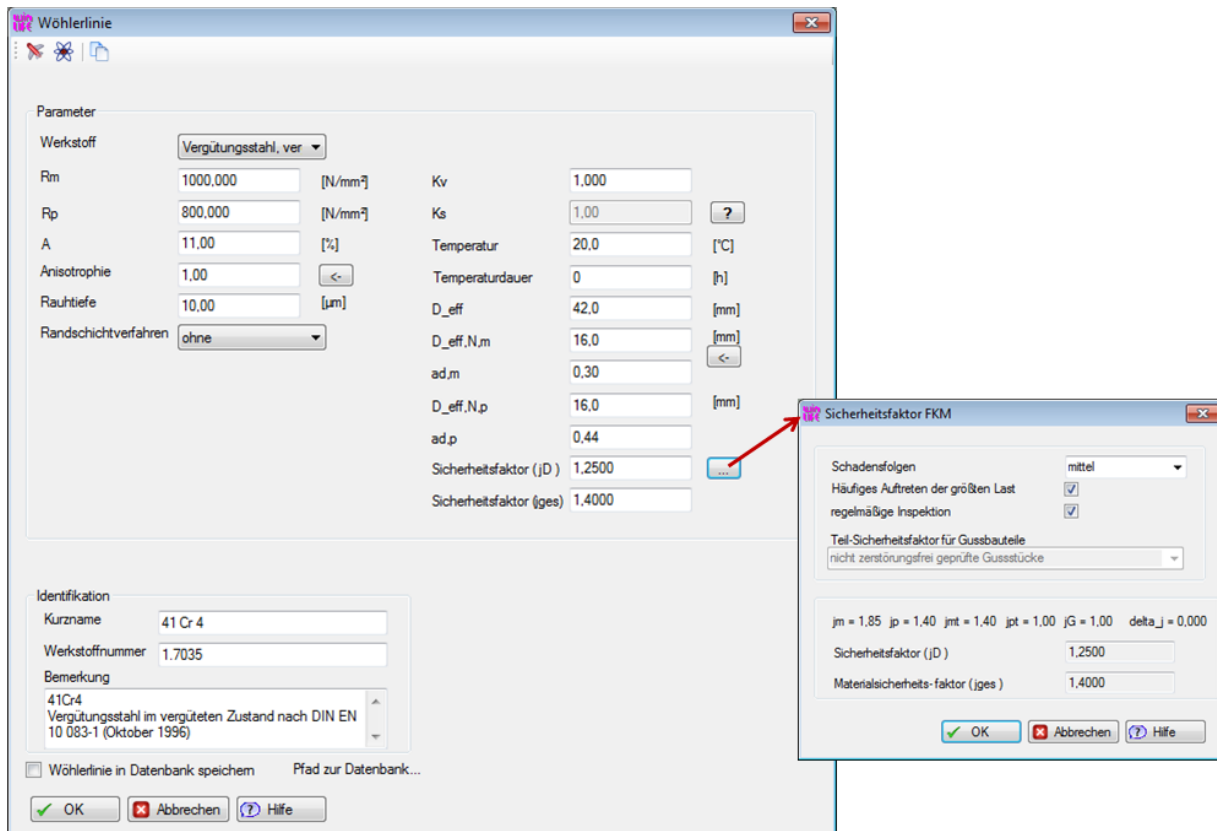
Menü *Wöhlerlinie / Laden FKM...*

Im folgenden Fenster wird für die *Bezeichnung nach DIN* der Werkstoff: 41 Cr 4 eingetragen. Daraufhin findet man den gesuchten Werkstoff und wählt diesen aus durch Klicken auf OK.



## Werkstoffauswahl aus FKM Datenbank

Die zu ergänzenden Werkstoffangaben können der FKM Richtlinie entnommen werden. Der Sicherheitsfaktor wird hier durch entsprechende Angaben im gezeigten Fenster bestimmt. Schließlich ergibt sich folgende Abbildung für die Eingaben zu der Wöhlerlinie.



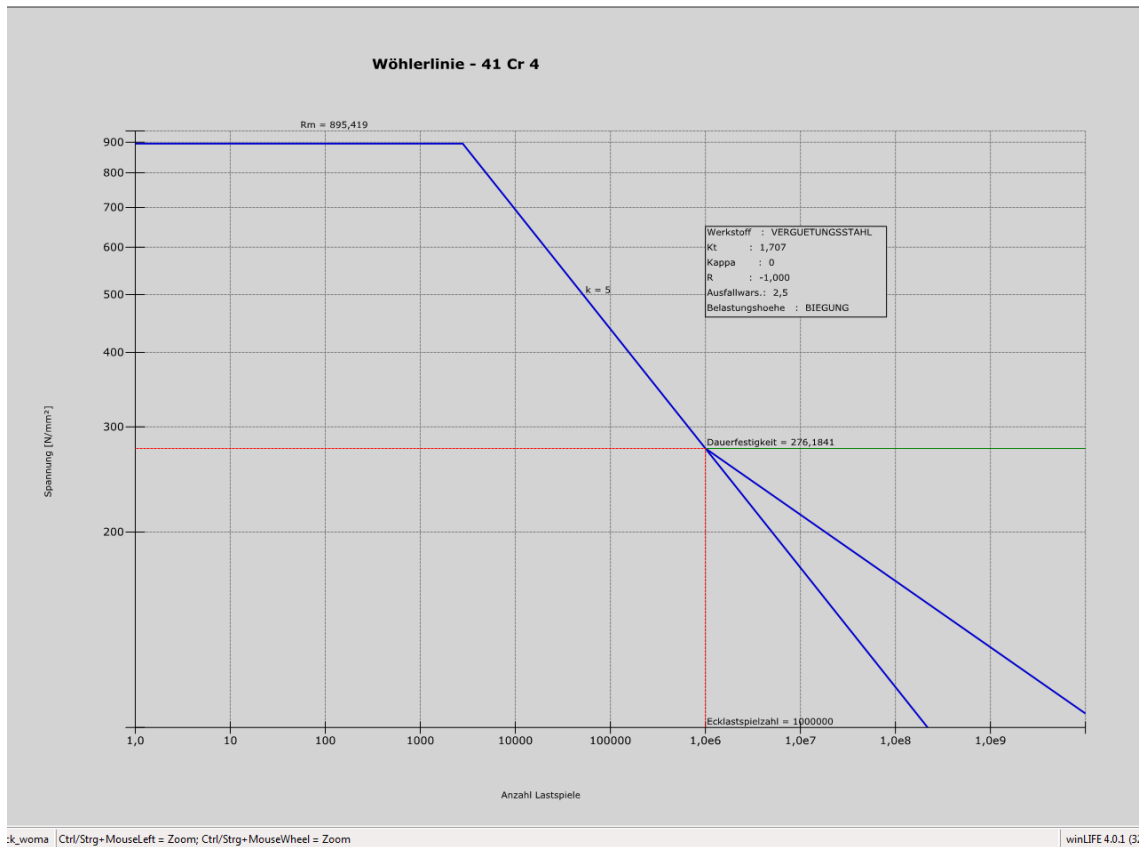
## Werkstoffangaben

Aus den gerade getätigten Eingaben wird eine Wöhlerlinie erzeugt. Über die Befehlsfolge

Menü **Wöhlerlinie/ Wöhlerlinie**

Wird diese gezeigt.



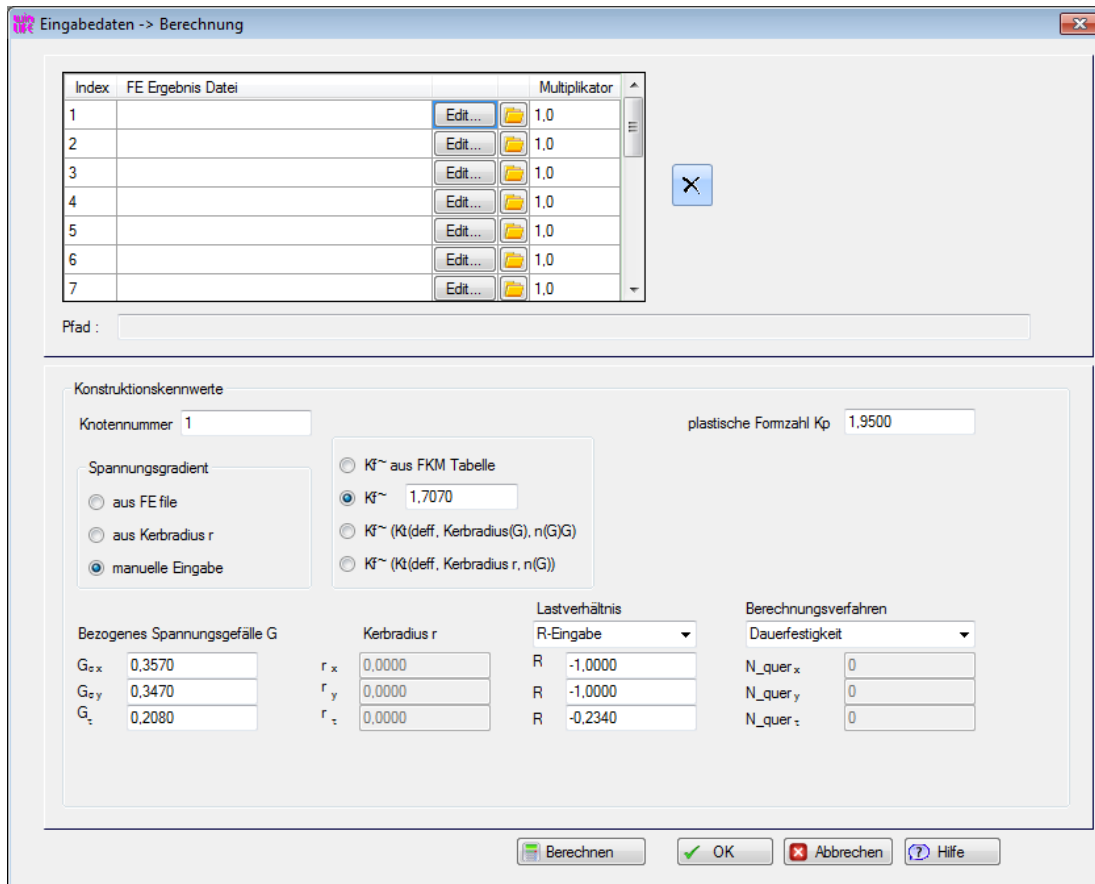


## Wöhlerlinie für das Material 41 Cr 4

Nun folgt der Schritt der Belastungseingabe. Das Vorgehen wird hier dokumentiert.

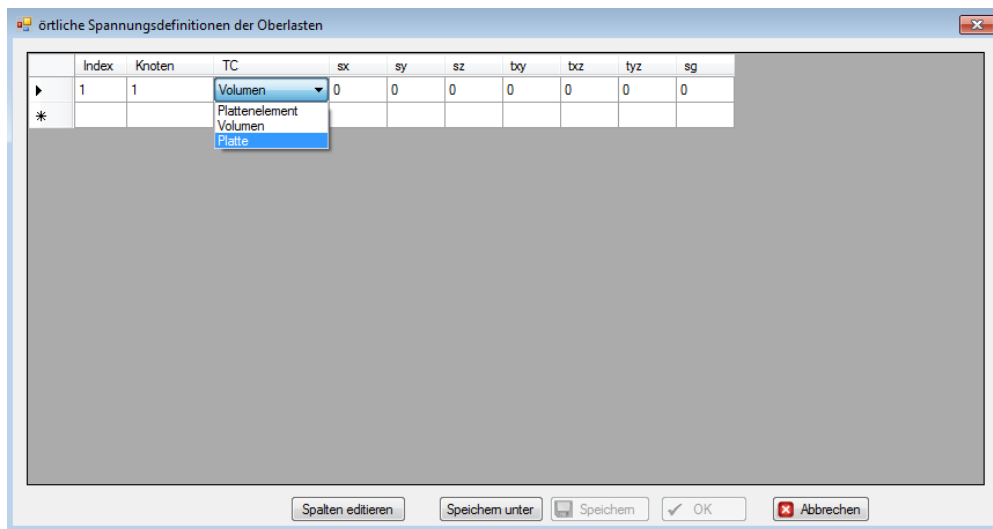
Menü **Berechnung** das unten dargestellte Bild erscheint

Hier werden also die Angaben zur Belastung gemacht.



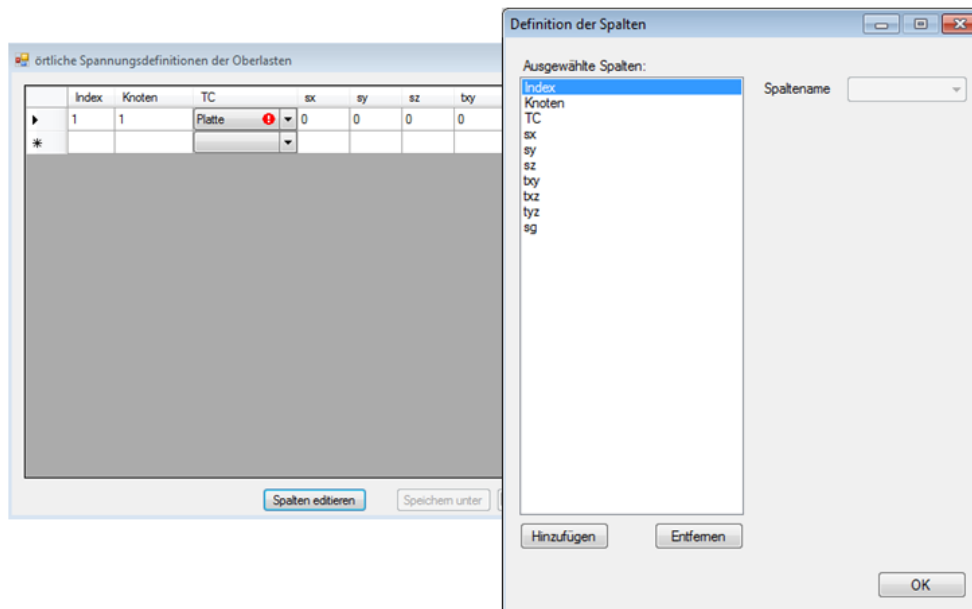
### Angaben im Dialog Berechnung

Zunächst erfolgt die Eingabe der örtlichen Spannungen am Nachweispoint. Dazu wird in der ersten Zeile auf die Schaltfläche **Edit** geklickt (obere Abbildung). Es öffnet sich ein neues Fenster. Hier wird der Spannungstensor angegeben. Für den vorliegenden Fall des ebenen Spannungszustandes soll der Spannungstensor für ein Plattenelement selektiert werden. In der Spalte **TC** wird daher **Platte** aus der Drop-Down Liste gewählt.



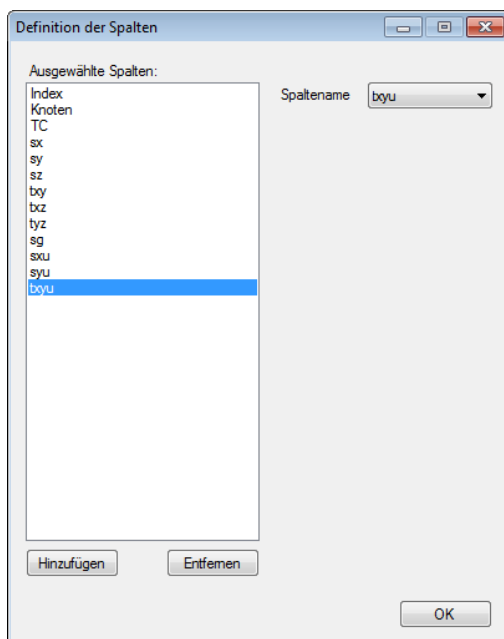
### Angabe der örtlichen Spannungen

Die Spaltenüberschriften müssen nun für die Plattenelemente vorbereitet werden. Dazu geht man auf den Button **Spalten editieren**.



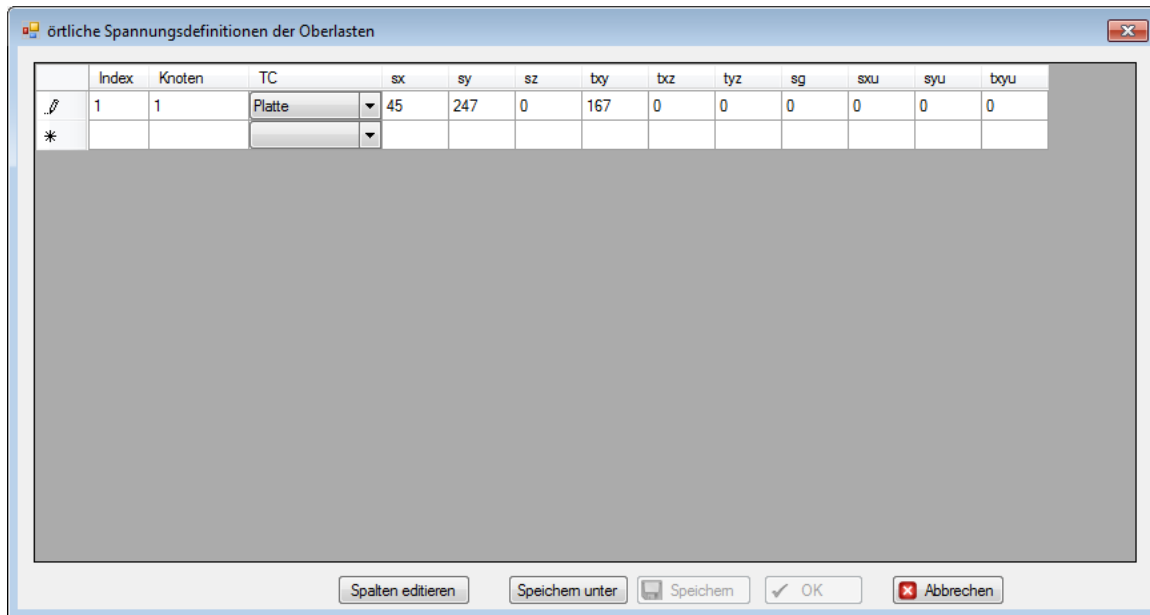
### Definition von Spaltenüberschriften

Fortlaufend wird jetzt auf **Hinzufügen** geklickt und der benötigte Spaltenname aus der rechten Drop-Down Liste gewählt. Es sind 3 neue Spalten hinzuzufügen. Es handelt sich um die Spalten **sxu**, **syu** und **txyu** wie unten gezeigt ist.



### Definition von Spaltenüberschriften

Nachdem die drei neuen Überschriften definiert sind wird **OK** geklickt und der Spannungstensor wird in die Tabelle eingetragen.

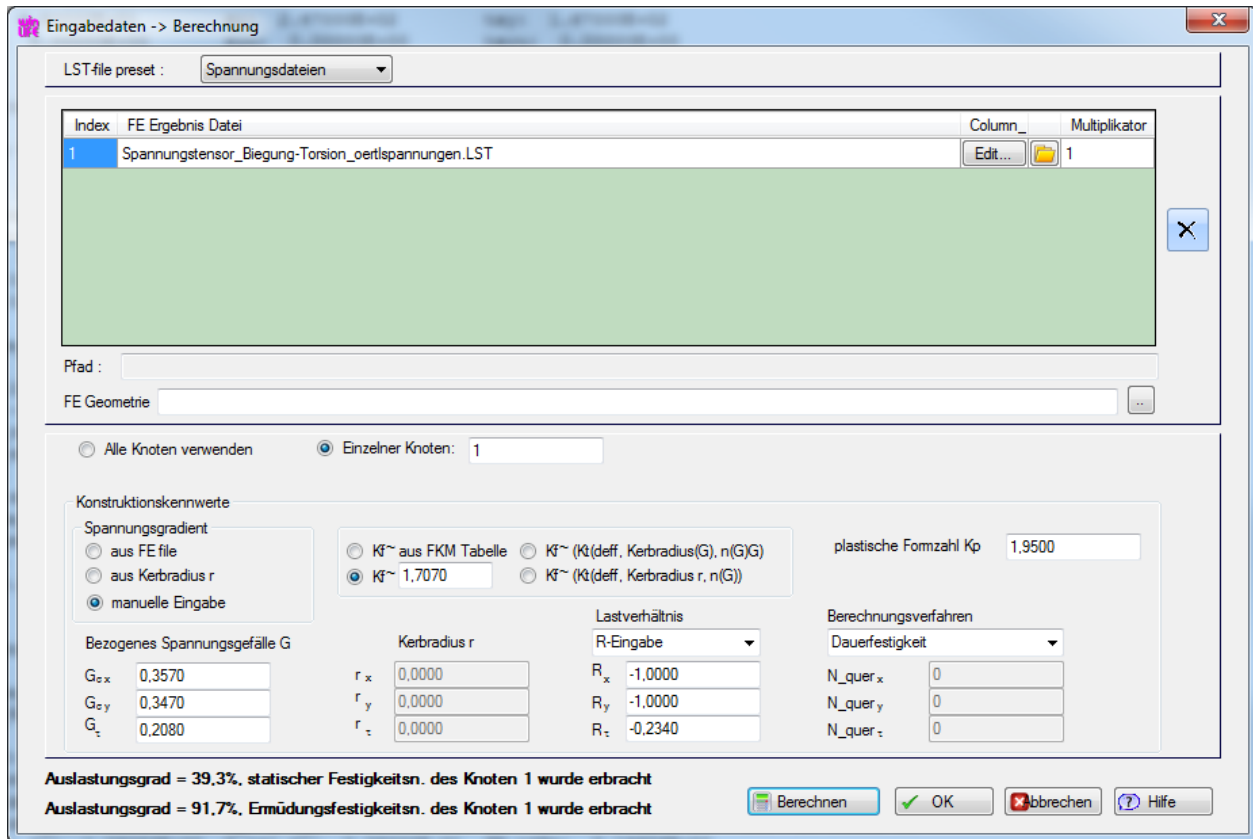


### Angabe des Spannungstensors

Die Datei enthält also die auftretenden Spannungen am Nachweispunkt. Die Datei wird gespeichert. Klicken Sie bitte hierzu auf den Button *Speichern unter*. In diesem Beispiel lautet der Dateiname *Spannungstensor\_Biegung-Torsion\_oertlspannungen.LST*. Aber der Anwender ist in der Wahl des Dateinamens natürlich frei.

Nun werden die weiteren Angaben im unten gezeigten Fenster durchgeführt.

Die plastische Formzahl wird gemäß der FKM Richtlinie ermittelt zu 1,95. Die bezogenen Spannungsgefälle berechnen sich mit Hilfe der Spannungen am Nachbarpunkt (siehe bitte hierzu die FKM-Richtlinie Kapitel 6.1.4). Als Kerbwirkungszahl wird 1,707 für die y-Spannungskomponente verwendet, da diese Spannungskomponente aufgrund ihrer Höhe als relevant anzusehen ist. Als weitere Eingaben folgen die Spannungsverhältnisse und das Berechnungsverfahren, hier *Dauerfestigkeit*. Schließlich sollte das Fenster so ausgefüllt sein wie die untere Abbildung zeigt.



## Berechnungsangaben

Die Festigkeitsberechnung wird durchgeführt durch Klicken auf den Button **Berechnen**. Es ergeben sich die Auslastungsgrade für die statische Festigkeit von 39,3% und für die Ermüdungsfestigkeit von 91,7%. Diese entscheidenden Ergebnisse werden jetzt unten links eingeblendet.

## 5.4. Ergebnis

Das Protokoll in winLIFE FKM QUICKCHECK zeigt neben den Auslastungsgraden für die statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit auch Zwischenergebnisse der Berechnung. Der Anwender kann somit die Berechnungen gut nachvollziehen und die Zwischenschritte mit den Gleichungen aus der FKM-Richtlinie gegenüberstellen.

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Ergebnis-Protokoll für den statischen Festigkeitsnachweis. Dabei ist ganz unten der Auslastungsgrad aufgeführt, hier 39,3%.

```

Protokoll

Werkstoffkennwerte
Rm: 8.95422E+02 Kdm: 8.95422E-01 KA: 1.00000E+00 RmN: 1.00000E+03 (3.2.1)
Rp: 6.72407E+02 Kdp: 8.40509E-01 KA: 1.00000E+00 RpN: 8.00000E+02
Spannungen aus der Summe der Lastfälle
sx: 4.50000E+01 sy: 2.47000E+02 txy: 1.67000E+02
sxu: 0.00000E+00 syu: 0.00000E+00 txyu: 0.00000E+00

Statischer Festigkeitsnachweis für den Knoten 1
Temperaturfaktor
KT,m = KI,p: 1,00000E+00 (3.2.22 - 3.2.27)
Hauptspannungen
h1: 3.41167E+02 h2: 0.00000E+00 h3: -4.91666E+01
hydrostatische Spannung sigma_H
sigma_H: 9.73333E+01 (3.1.11)
Duktilitätsfaktor q, Festigkeitsfaktor f_sigma, Gussfaktor KNL
q: 0.00000E+00 f_sigma: 1.00000E+00 KNL: 1.00000E+00 (Zug)
q: 0.00000E+00 f_sigma: 1.00000E+00 KNL: 1.00000E+00 (Druck)
Vergleichsspannung
sigma_v: 3.68220E+02 (3.1.4)
Mehrachsigkeit
h: 2.64335E-01 sigma_H: 9.73333E+01 sigma_GH: 3.68220E+02 (3.1.10)
plastische Stützzahl - npl
eps_ref: 1.10000E-01 A: 1.10000E+01 (3.3.4)
eps_extr: 1.10000E-01 eps_0: 5.00000E+00 (3.3.3)
npl: 1.95000E+00 E: 2.10000E+05 Kp: 1.95000E+00 (3.3.2)
Bauteilfestigkeit - sigma_SK
sigma_SK: 1.31119E+03 (3.4.1)
Vergleichsauslastungsgrad - aSK
aSK: 3.93159E-01 sigma_v: 3.68220E+02 sigma_SK: 1.31119E+03 jges: 1.40000E+00 (3.6.1)
Der statische Festigkeitsnachweis wurde zu 39,3% erbracht.

```

## Protokoll der Festigkeitsberechnung, statischer Nachweis

Nun wird der Ausschnitt aus dem Ergebnis-Protokoll gezeigt, der für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit relevant ist. Der Auslastungsgrad bezogen auf die Dauerfestigkeit beträgt 91,7% wie man der untersten Zeile entnehmen kann.

```

Protokoll

Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Knoten 1
Bauteil-Normwerte
sigma_W,zd: 4.02940E+02 fW,sigma: 4.50000E-01 Rm: 8.95422E+02 (4.2.1)
tau_W,s: 2.32496E+02 fW,tau: 5.77000E-01
Temperaturfaktor
KT,D: 1.00000E+00 (4.2.4)
Stützzahlen nach Stiebler
n_sigma_x: 1.08804E+00 G_sigma_x: 3.57000E-01 aG: 5.00000E-01 bG: 2.70000E+03 (4.3.8)
n_sigma_y: 1.08660E+00 G_sigma_y: 3.47000E-01 aG: 5.00000E-01 bG: 2.70000E+03
n_tau_xy: 1.09283E+00 G_tau_xy: 2.08000E-01 fW,t*Rm: 5.16659E+02
Schätzwert der Kerbwirkungszahl
Kf_sigma_x: 1.70700E+00 Kt_sigma_x: 1.00000E+00 (4.3.2)
Kf_sigma_y: 1.70700E+00 Kt_sigma_y: 1.00000E+00
Kf_tau_xy: 1.70700E+00 Kt_tau_xy: 1.00000E+00
Rauheitsfaktor
KR_sigma: 8.56780E-01 aR_sigma: 2.20000E-01 r_t: 1.00000E+01 Rm,N,min: 4.00000E+02 (4.3.21)
KR_tau: 9.17362E-01 fW,t*aR_sigma: 1.26940E-01
Konstruktionsfaktoren
KWK_sigma_x: 1.00908E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.00000E+00 (4.3.1)
KWK_sigma_y: 1.01024E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.00000E+00
KWK_tau_xy: 9.63347E-01 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00
Bauteil-Wechselfestigkeit
sigma_x_WK: 3.99313E+02 (4.4.1)
sigma_y_WK: 3.98857E+02
tau_xy_WK: 2.41342E+02
Mittelspannungsempfindlichkeit
M_sigma: 2.13398E-01 aM: 3.50000E-01 bM: -1.00000E-01 (4.4.5)
M_tau: 1.23131E-01
Mittelspannungsfaktor
KAK_sigma_x: 1.00000E+00 R: -1.00000E+00 sm/sa: 0.00000E+00 (4.4.8 - 4.4.12)
KAK_sigma_y: 1.00000E+00 R: -1.00000E+00 sm/sa: 0.00000E+00
KAK_tau_xy: 9.28994E-01 R: -2.34000E-01 sm/sa: 6.20746E-01
Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit
sigma_x_AK: 3.99313E+02 (4.4.4)
sigma_y_AK: 3.98857E+02
tau_xy_AK: 2.24206E+02
ertragbare Nennwerte der Amplitude
sigma_x_BK: 3.99313E+02 KBK_sigma: 1.00000E+00 (4.4.38)
sigma_y_BK: 3.98857E+02 KBK_sigma: 1.00000E+00
tau_xy_BK: 2.24206E+02 KBK_tau: 1.00000E+00
Maximalwert der Amplitude
sigma_BKmax: 9.83395E+02 (4.4.40)
tau_BKmax: 5.67419E+02
Nachweis - einzelne Spannungsarten
jD: 1.25000E+00
aBK_sigma_x: 1.40867E-01 sa: 4.50000E+01 sigma_BK: 3.99313E+02 (4.6.3)
aBK_sigma_y: 7.74086E-01 sa: 2.47000E+02 sigma_BK: 3.98857E+02
aBK_tau_xy: 5.74467E-01 sa: 1.03039E+02 tau_BK: 2.24206E+02
Nachweis - zusammengesetzte Spannungsarten
aBK_sigma_v: 9.16527E-01 aNH: 1.11341E+00 aGH: 9.16527E-01 q: 0.00000E+00 (4.6.5)
Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis wurde zu 91,7% erbracht.

```

## Protokoll der Festigkeitsberechnung, Ermüdungsnachweis

## 5.5. Berücksichtigung von Finite-Elemente-Ergebnisse

Das aktuelle winLIFE FKM-Modul ist in der Lage Finite-Elemente Ergebnisse einzulesen und auszuwerten. Die NASTRAN Ergebnisse (op2-Datei) werden ausgewählt und der relevante Lastfall eingestellt. Der Spannungsgradient wird aus dem FE-Modell bestimmt und die Kerbwirkungszahl wird der FKM-Tabelle entnommen. Die plastische Formzahl wurde hier nicht mit der FE-Methode bestimmt, sondern der FKM-Richtlinie entnommen. Für Anwender des VIEWER4WINLIFE empfiehlt es sich die NASTRAN dat-Datei einzulesen, um die Ergebnisse im Anschluss an die Berechnung darstellen zu können.

Werden alle Knoten verwendet, kann von mehreren Minuten Berechnungszeit ausgegangen werden.

Eingabedaten -> Berechnung

LST-file preset : winlifeFE

Index	FE Ergebnis Datei	Multiplikator	Lastfall
1	welle_fkm_614.op2	1	LAGERUNG - SO

Pfad :  
FE Geometrie \Welle\_FKM\_614.dat

Alle Knoten verwenden  Einzelner Knoten: 25295

Konstruktionskennwerte

Spannungsgradient

aus FE file  aus Kerbradius r  manuelle Eingabe

$Kf^{\sim}$  aus FKM Tabelle   $Kf^{\sim}$  ( $Kf$ (def., Kerbradius(G), n(G)/G))   $Kf^{\sim}$  ( $Kf$ (def., Kerbradius r, n(G))

plastische Formzahl Kp 1,9500

Bezogenes Spannungsgefälle G

$G_{zx}$  0,3570  $G_{zy}$  0,3470  $G_z$  0,2080

Kerbradius r

$r_x$  0,0000  $r_y$  5,0000  $r_z$  0,0000

Lastverhältnis

R-Eingabe

$R_x$  -1,0000  $R_y$  -1,0000  $R_z$  -0,2340

Berechnungsverfahren

Dauerfestigkeit

$N_{quer_x}$  0  $N_{quer_y}$  0  $N_{quer_z}$  0

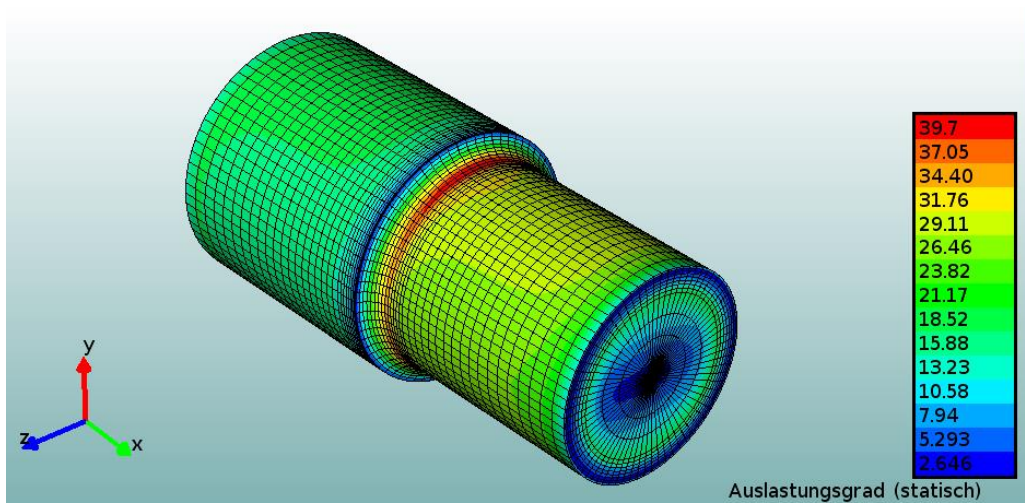
Auslastungsgrad = 39,7%, statischer Festigkeitsn. des Knoten 2903 wurde erbracht  
Auslastungsgrad = 91,8%, Ermüdungsfestigkeitsn. des Knoten 2903 wurde erbracht

Berechnen OK Abbrechen Hilfe

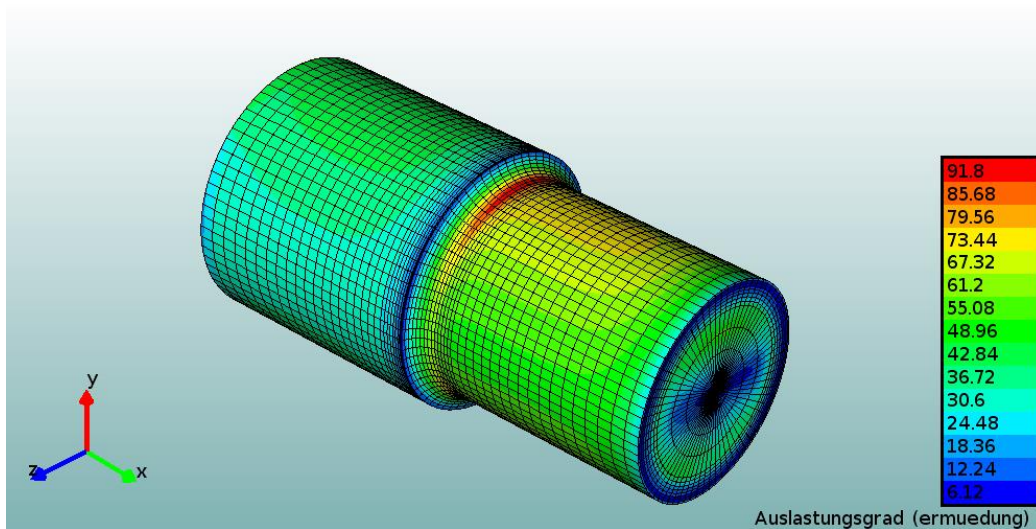
### Einstellungen für die Verwendung von NASTRAN Ergebnisse

Die Ergebnisse betragen für den statischen Auslastungsgrad 39,7% und für den dynamischen Auslastungsgrad 91,8%. Die Auslastungsgrade nach der FKM-Richtlinie für das Beispiel 6 sind angegeben mit 39% (statisch) und 92% (dynamisch). Die Abweichungen zu der FKM-Richtlinie sind also gering.

Die Ergebnisse der Auslastungsgrade sind folgend dargestellt.



Ergebnis der statischen Auslastung



Ergebnis der dynamischen Auslastung







# 6. Beispiel 29 / FKM Beispiel Gussbauteil

---

## 6.1. Aufgabenstellung

Das Gussbauteil aus der FKM Richtlinie, Kapitel 6.2, soll hier mit dem winLIFE FKM QUICKCHECK / FKM nachgerechnet werden. Die untere Abbildung zeigt die Geometrie des Bauteils mit dem Nachweispunkt.

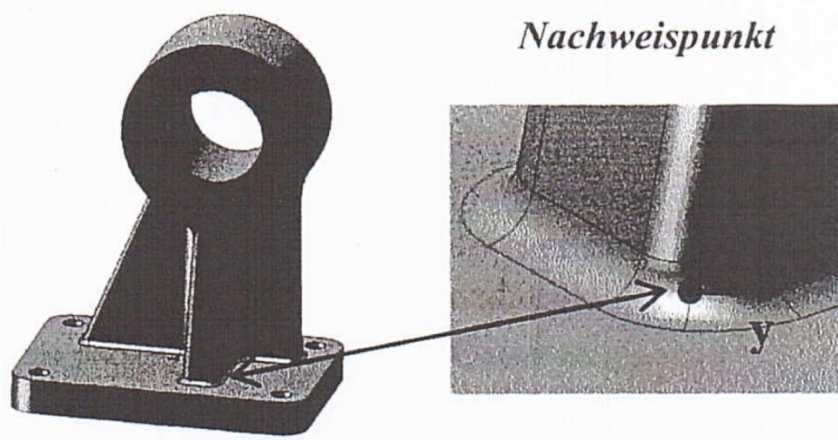


Abbildung des Gussbauteils [FKM Richtlinie]

---

## 6.2. Materialangabe und örtliche Spannungen

Der Lagerbock besteht aus dem Werkstoff EN-GJL-250 (alt GG-25).

Die Rauheit der Oberfläche beträgt  $R_z = 200\mu\text{m}$ .

Für den Nachweispunkt sind die folgenden Spannungen aus einer FEM-Analyse gegeben (vgl. FKM-Richtlinie Kapitel 6.2.0):

Oberlastfall:

$$\sigma_{x,0} = 60\text{MPa}$$

$$\sigma_{y,0} = 16\text{MPa}$$

Unterlastfall:

$$\sigma_{x,U} = -34\text{MPa}$$

$$\sigma_{y,U} = -8\text{MPa}$$

$$\tau_{xy,0} = 1\text{MPa}$$

$$\tau_{xy,U} = -1\text{MPa}$$

Für den Festigkeitsnachweis nach FKM in winLIFE werden örtliche Spannungen verwendet.

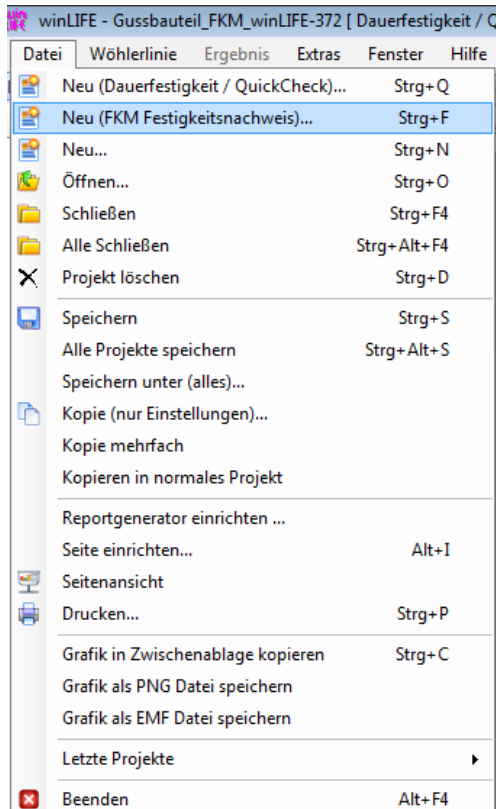
---

## 6.3. Projektaufbau in winLIFE, Modul QUICK CHECK / FKM

In winLIFE 4.0 2018 erfolgt nun die Projektdefinition. Dazu wird gewählt:

Menü *Datei / Neu (FKM Festigkeitsnachweis)...*

Das folgende Fenster stellt die Befehlsfolge dar:



### Wahl des Festigkeitsnachweises in winLIFE

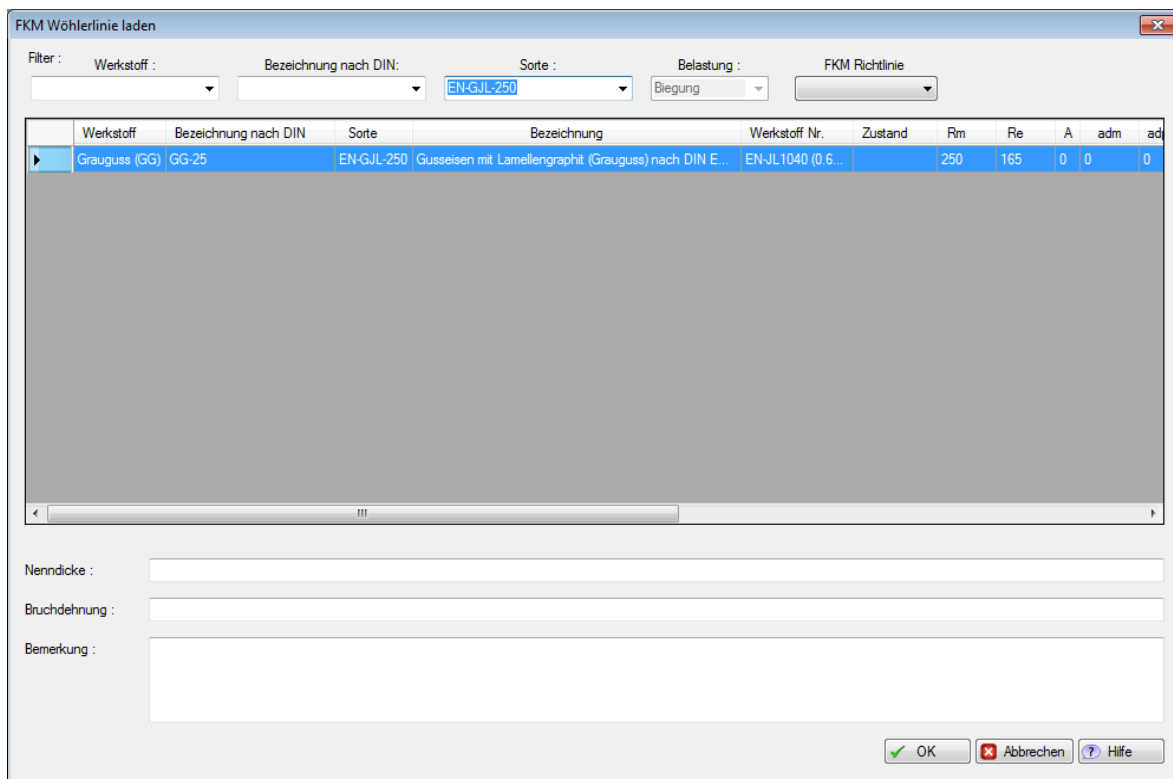
Der Anwender wählt nun einen Dateiname für das winLIFE FKM QUICKCHECK Projekt, z.B. eignet sich: *Gussbauteil\_FKM.wlf*.

Als nächstes wird die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs im Menü *Wöhlerlinie* festgelegt.

Der Werkstoff EN-GJL-250 liegt in der winLIFE 4.0 2018 FKM Datenbank vor und kann wie folgt gewählt werden:

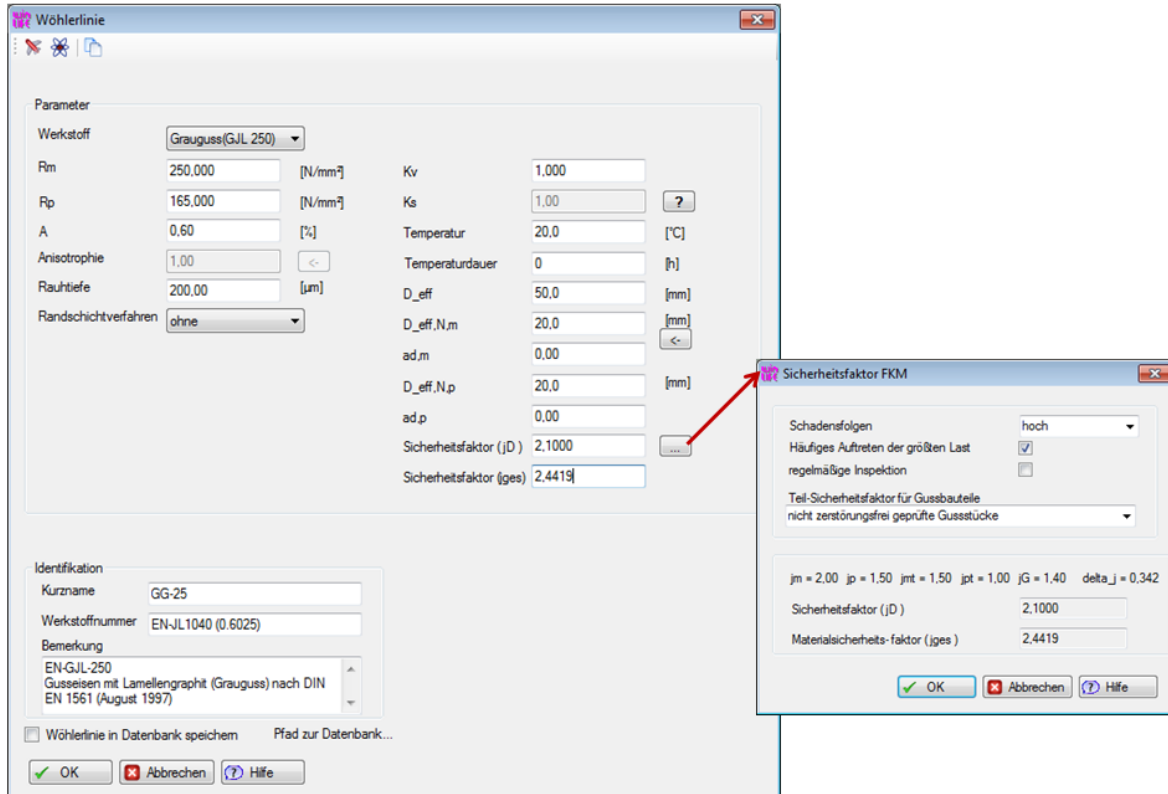
Menü *Wöhlerlinie / Laden FKM...*

Daraufhin öffnet sich ein neues Fenster und es wird im Feld *Sorte* der Werkstoff: EN-GJL-250 eingetragen. Der gesuchte Werkstoff erscheint nun und man wählt diesen aus durch Klicken auf OK.



### Werkstoffauswahl aus der FKM Datenbank

Die zu ergänzenden Werkstoffangaben können der FKM Richtlinie entnommen werden. Der Sicherheitsfaktor wird hier durch entsprechende Angaben im gezeigten Fenster bestimmt. Schließlich ergibt sich folgende Abbildung für die Eingaben zu der Wöhlerlinie.

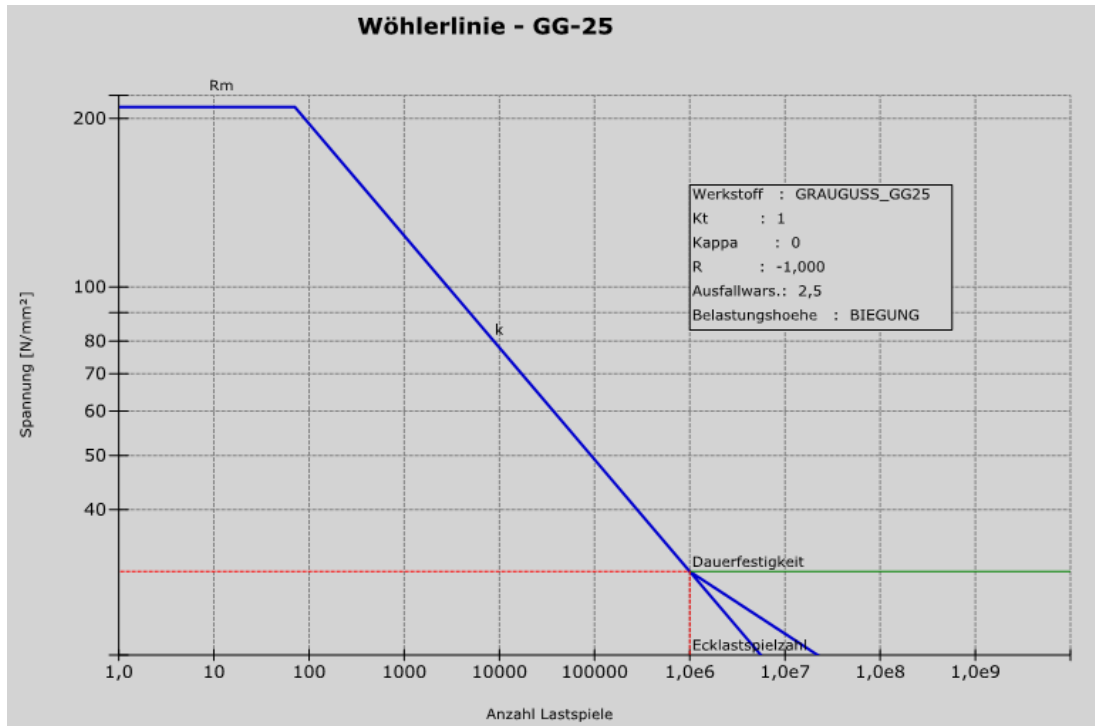


## Werkstoffangaben

Aus den gerade getätigten Eingaben wird eine Wöhlerlinie erzeugt. Über die Befehlsfolge

Menü **Wöhlerlinie / Wöhlerlinie**

wird diese gezeigt.

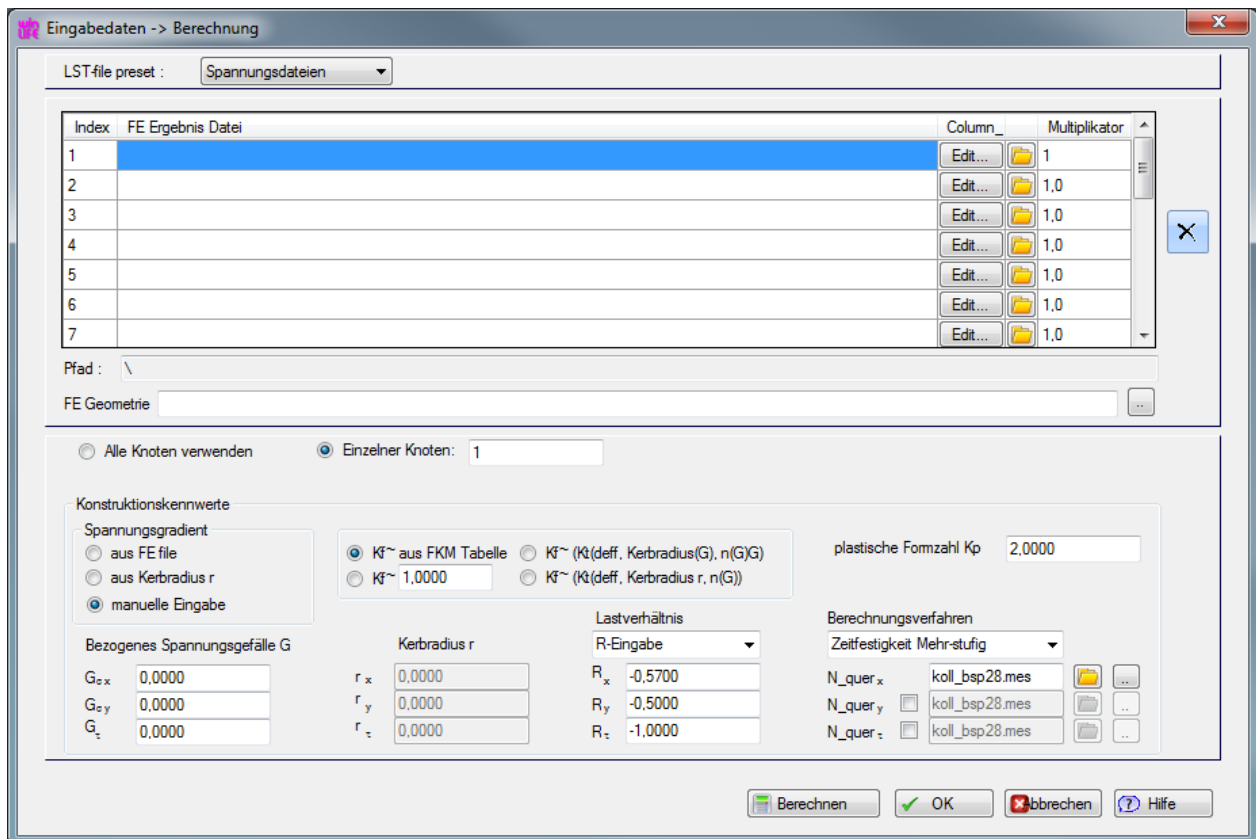


### Wöhlerlinie für das Material EN-GJL-250 (GG-25)

Nun folgt der Schritt der Belastungseingabe. Das Vorgehen wird hier dokumentiert.

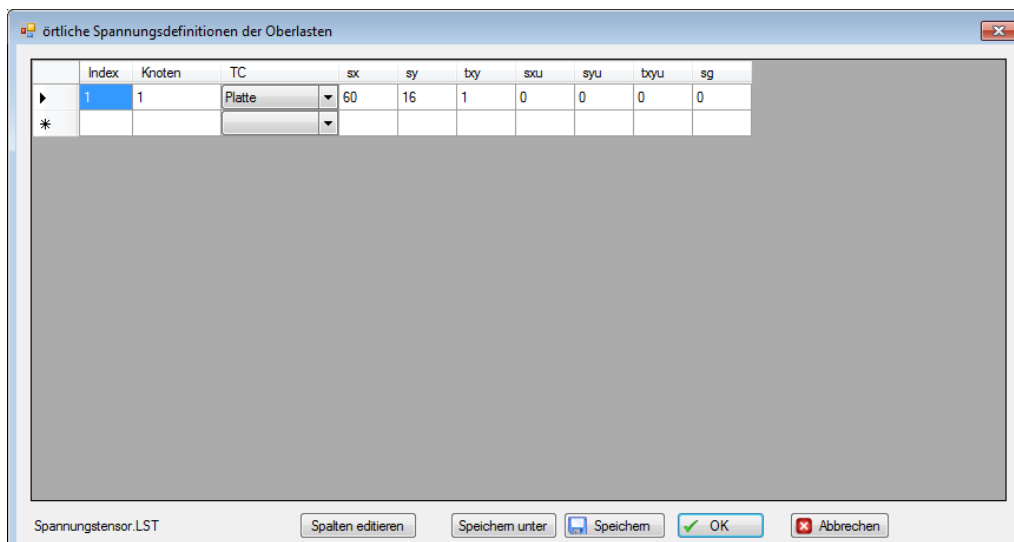
Menü **Berechnung** das unten dargestellte Bild erscheint

Hier werden also die Angaben zur Belastung gemacht.



## Angaben im Dialog Berechnung

Zunächst erfolgt die Eingabe der örtlichen Spannungen am Nachweispoint. Dazu wird die vorhandene Datei *Spannungstensor.LST* geöffnet, indem in der ersten Zeile auf die Schaltfläche mit dem Ordnersymbol geklickt wird (obere Abbildung). In dieser Datei ist der folgende Spannungstensor angegeben:



## Angabe der örtlichen Spannungen

Die Datei enthält also die auftretenden Spannungen am Nachweispoint. Im vorherigen winLIFE 4.0 2018 Beispiel wird die Erstellung und Änderung einer solchen LST-Datei beschrieben.

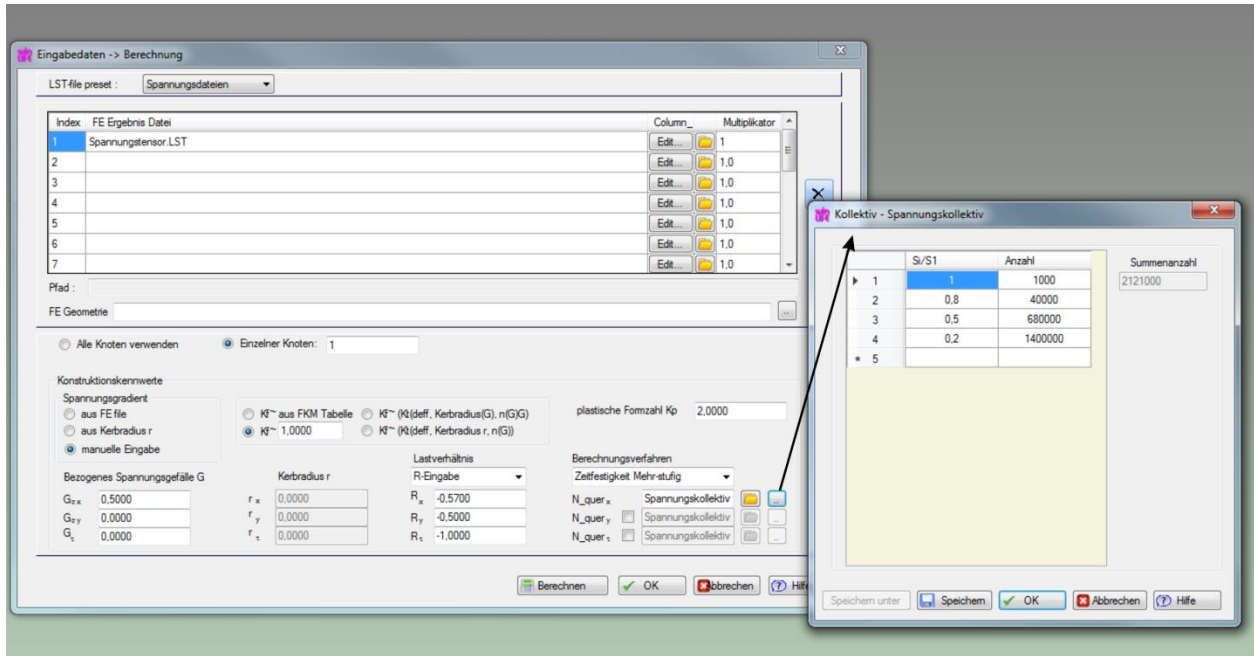
Nun werden die weiteren Angaben im unten gezeigten Fenster getätigt.



Der Wert für die plastische Formzahl  $K_p$  braucht laut FKM nicht berechnet werden - damit wird hier für die plastische Stützzahl die Plastizitätszahl des Werkstoffs verwendet. Als weitere Eingaben folgen das Spannungsgefälle, die Spannungsverhältnisse und das Berechnungsverfahren, hier **Zeitfestigkeit Mehr-stufig**.

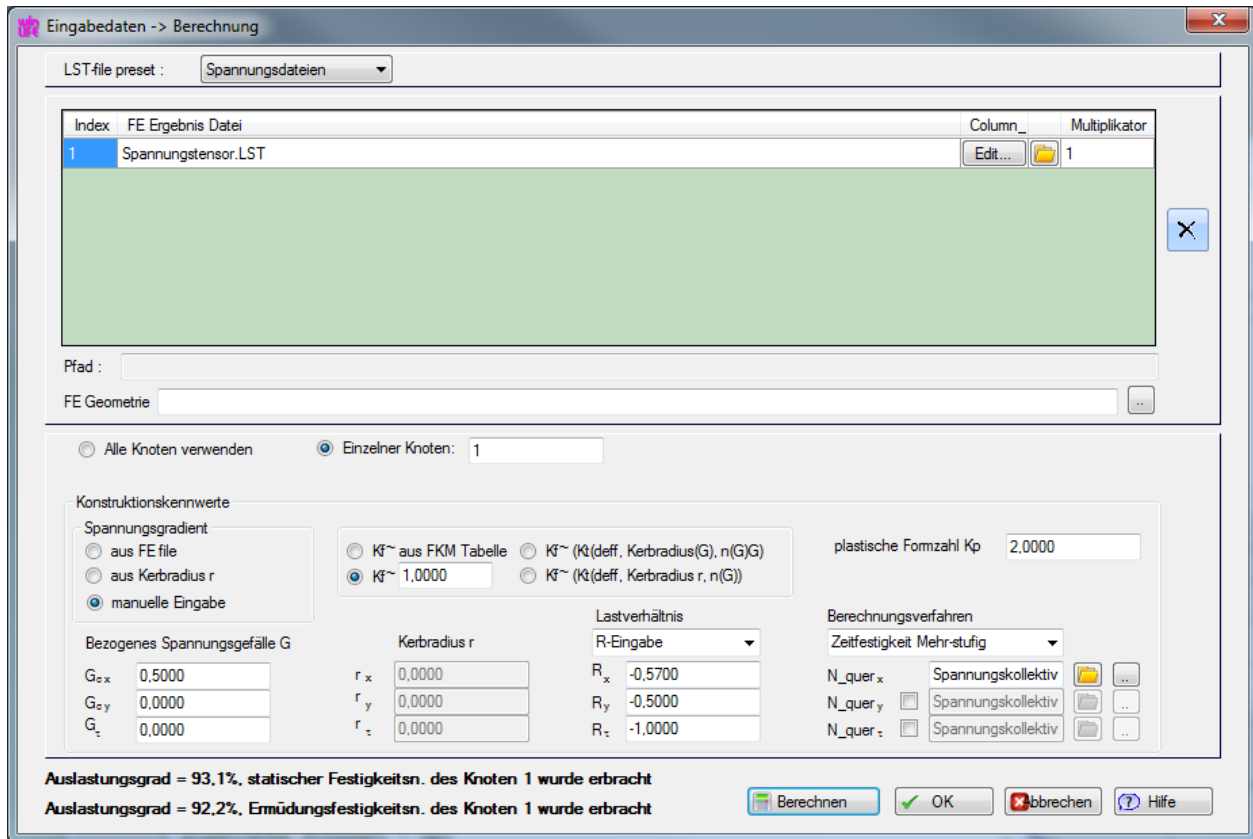
Die wirkende mehrstufige Belastung auf das Bauteil, wird in Tabellenform angegeben (siehe Abbildung unten). Für die drei Spannungskomponenten  $x$ ,  $y$  und  $\tau$  wirkt nach Aufgabenstellung das gleiche Kollektiv.

Schließlich sollte das Fenster so ausgefüllt sein wie die untere Abbildung zeigt.



## Eingabe des Spannungskollektivs

Nun wird die Festigkeitsberechnung durchgeführt durch Klicken auf den Button **Berechnen**. Es ergeben sich die Auslastungsgrade für die statische Festigkeit von 93,1% und für die Ermüdungsfestigkeit von 92,2%. Diese Ergebnisse werden im Fenster links eingeblendet (siehe bitte Abbildung unten).



Eingaben und Ergebnisse der Auslastungsgrade

## 6.4. Ergebnis

Das Protokoll in winLIFE FKM QUICKCHECK zeigt neben den Auslastungsgraden für die statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit auch Zwischenergebnisse der Berechnung. Der winLIFE Anwender kann somit die Berechnungen gut nachvollziehen und die Zwischenschritte mit den Gleichungen aus der FKM-Richtlinie gegenüberstellen.

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Ergebnis-Protokoll für den statischen Festigkeitsnachweis. Dabei ist ganz unten der Auslastungsgrad aufgeführt, hier 93,1%.

```

Protokoll

Werkstoffkennwerte
Rm: 2.09552E+02 Kdm: 8.38208E-01 KA: 1.00000E+00 RmN: 2.50000E+02 (3.2.1)
Rp: 1.38304E+02 Kdp: 8.38208E-01 KA: 1.00000E+00 RpN: 1.65000E+02

Spannungen aus der Summe der Lastfälle
sx: 6.00000E+01 sy: 1.60000E+01 txy: 1.00000E+00
sxu: 0.00000E+00 syu: 0.00000E+00 txyu: 0.00000E+00

Statischer Festigkeitsnachweis für den Knoten 1
Temperaturfaktor
KT,m = KT,p: 1,00000E+00 (3.2.22 - 3.2.27)
Hauptspannungen
h1: 6.00227E+01 h2: 1.59773E+01 h3: 0.00000E+00
hydrostatische Spannung sigma_H
sigma_H: 2.53333E+01 (3.1.11)
Duktilitätsfaktor q, Festigkeitsfaktor f_sigma, Gussfaktor KNL
q: 1.00000E+00 f_sigma: 1.00000E+00 KNL: 1.10000E+00 (Zug)
q: 1.00000E+00 f_sigma: 2.50000E+00 KNL: 9.10000E-01 (Druck)
Vergleichsspannung
sigma_v: 5.45661E+01 (3.1.5)
Mehrachsigkeit
h: 4.70509E-01 sigma_H: 2.53333E+01 sigma_GH: 5.38424E+01 (3.1.10)
plastische Stützzahl - npl
eps_ref: 2.40000E-03 A: 6.00000E-01 (3.3.5)
eps_ertr: 1.48097E-03 eps_0: 1.38304E-03 (3.3.3)
npl: 1.03480E+00 E: 1.00000E+05 Kp: 2.00000E+00 (3.3.2)
Bauteilfestigkeit - sigma_SK
sigma_SK: 1.43117E+02 (3.4.1)
Vergleichsauslastungsgrad - aSK
aSK: 9.31016E-01 sigma_v: 5.45661E+01 sigma_SK: 1.43117E+02 jges: 2.44189E+00 (3.6.1)
Auslastungsgrad = 93.1%, statischer Festigkeitsnachweis wurde erbracht.

```

## Protokoll der Festigkeitsberechnung, statischer Nachweis

Nun wird der Ausschnitt aus dem Ergebnis-Protokoll gezeigt, der für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit relevant ist. Der Auslastungsgrad bezogen auf die Dauerfestigkeit beträgt 92,2% wie man der untersten Zeile entnehmen kann.

```

Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Knoten 1
Bauteil-Normwerte
sigma_W,zd: 7.12477E+01 fW,sigma: 3.40000E-01 Rm: 2.09552E+02 (4.2.1)
tau_W,s: 7.12477E+01 fW,tau: 1.00000E+00

Temperaturfaktor
KT,D: 1.00000E+00 (4.2.4)
Stützzahlen nach Stielzer
n_sigma_x: 1.68234E+00 G_sigma_x: 5.00000E-01 aG: -5.00000E-02 bG: 3.20000E+03 (4.3.8)
n_sigma_y: 1.00000E+00 G_sigma_y: 0.00000E+00 aG: -5.00000E-02 bG: 3.20000E+03
n_tau_xy: 1.00000E+00 G_tau_xy: 0.00000E+00 fW,t*Rm: 2.09552E+02
Schätzwert der Kerbwirkungszahl
Kf~_sigma_x: 1.00000E+00 Kt_sigma_x: 1.00000E+00 (4.3.2)
Kf~_sigma_y: 1.00000E+00 Kt_sigma_y: 1.00000E+00
Kf~_tau_xy: 1.00000E+00 Kt_tau_xy: 1.00000E+00
Rauheitsfaktor
KR_sigma: 9.14081E-01 aR_sigma: 6.00000E-02 r_t: 2.00000E+02 Rm,N,min: 1.00000E+02 (4.3.21)
KR_tau: 9.14081E-01 fW,t*aR_sigma: 6.00000E-02
Konstruktionsfaktoren
KWK_sigma_x: 6.19316E-01 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.05000E+00 (4.3.1)
KWK_sigma_y: 1.04190E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.05000E+00
KWK_tau_xy: 1.09399E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00
Bauteil-Wechselhaftigkeit
sigma_x_WK: 1.15043E+02 (4.4.1)
sigma_y_WK: 6.83825E+01
tau_xy_WK: 6.51262E+01
Mittelspannungsempfindlichkeit
M_sigma: 5.00000E-01 aM: 0.00000E+00 bM: 5.00000E-01 (4.4.5)
M_tau: 5.00000E-01
Mittelspannungsfaktor
KAK_sigma_x: 8.79552E-01 R: -5.70000E-01 sm/sa: 2.73885E-01 (4.4.8 - 4.4.12)
KAK_sigma_y: 8.57143E-01 R: -5.00000E-01 sm/sa: 3.33333E-01
KAK_tau_xy: 1.00000E+00 R: -1.00000E+00 sm/sa: 0.00000E+00
Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit
sigma_x_AK: 1.01186E+02 (4.4.4)
sigma_y_AK: 5.86136E+01
tau_xy_AK: 6.51262E+01
ertragbare Nennwerte der Amplitude
sigma_x_BK: 1.96938E+02 KBK_sigma: 1.94630E+00 (4.4.38)
sigma_y_BK: 1.14080E+02 KBK_sigma: 1.94630E+00
tau_xy_BK: 1.15287E+02 KBK_tau: 1.77021E+00
Maximalwert der Amplitude
sigma_BKmax: 1.07338E+02 (4.4.40)
Begrenzung der Maximalamplitude
sigma_x_BK: 1.07338E+02 KBK_sigma_x: 1.06080E+00 (4.4.42)
Begrenzung der Maximalamplitude
sigma_y_BK: 1.07338E+02 KBK_sigma_y: 1.83128E+00
tau_BKmax: 1.07338E+02
Begrenzung der Maximalamplitude
tau_xy_BK: 1.07338E+02 KBK_tau_xy: 1.64815E+00
Nachweis - einzelne Spannungsarten
sigma_BK: 1.07338E+02 (4.6.3)
aBK_sigma_x: 9.21484E-01 sa: 4.71000E+01
aBK_sigma_y: 2.34773E-01 sa: 1.20000E+01
aBK_tau_xy: 1.95644E-02 sa: 1.00000E+00
tau_BK: 1.07338E+02
Nachweis - zusammengesetzte Spannungsarten
aBK_sigma_v: 9.22041E-01 aNH: 9.22041E-01 aGH: 8.29635E-01 q: 1.00000E+00 (4.6.5)
Auslastungsgrad = 92.2%, Ermüdungsfestigkeitsnachweis wurde erbracht.

```

## Protokoll der Festigkeitsberechnung, Ermüdungsnachweis





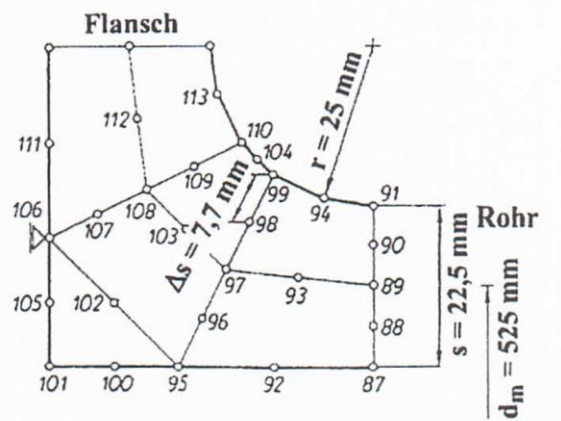


# 7. Beispiel 30 / FKM Beispiel Verdichterflansch

## 7.1. Aufgabenstellung

Als weiteres Beispiel wird ein Verdichterflansch aus Grauguss hinsichtlich seiner Festigkeit bewertet. Auch dieses Bauteil stammt wie die beiden vorherigen Beispiele aus der FKM Richtlinie (Kapitel 6.3).

Die Berechnung erfolgt mit dem winLIFE FKM QUICKCHECK /FKM Die untere Abbildung zeigt die Geometrie des Bauteils mit dem Nachweispunkt (Knotenpunkt 99).



FE-Modell des Verdichterflansches [FKM Richtlinie]

## 7.2. Materialangabe und örtliche Spannungen

Der Verdichterflansch besteht aus dem Werkstoff GJL-300 (alt GG-30).

Die Rauheit der Oberfläche beträgt  $R_z = 200 \mu\text{m}$ .

Für den Nachweispunkt (Knotenpunkt 99) sind die folgenden Spannungen in den Richtungen 1 (Längsrichtung) und 2 (Umfangsrichtung) gegeben (vgl. FKM-Richtlinie Kapitel 6.3.0):

$$\sigma_1 = \sigma_{1,m} \pm \sigma_{1,a} = 15,0 \text{ MPa} \pm 18,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{2,m} \pm \sigma_{2,a} = 5,0 \text{ MPa} \pm 6,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 0$$

Als Hinweis: Für den Festigkeitsnachweis nach FKM in winLIFE FKM QUICKCHECK /FKM werden örtliche Spannungen verwendet.

---

## 7.3. Umgebungsbedingungen

Der Verdichterflansch soll für Temperaturen von 380°C bei 100.000h ausgelegt werden.

---

## 7.4. Projektaufbau in winLIFE, Modul QUICK CHECK / FKM

In winLIFE 4.0 2018 erfolgt nun die Projektdefinition. Dazu wird gewählt:

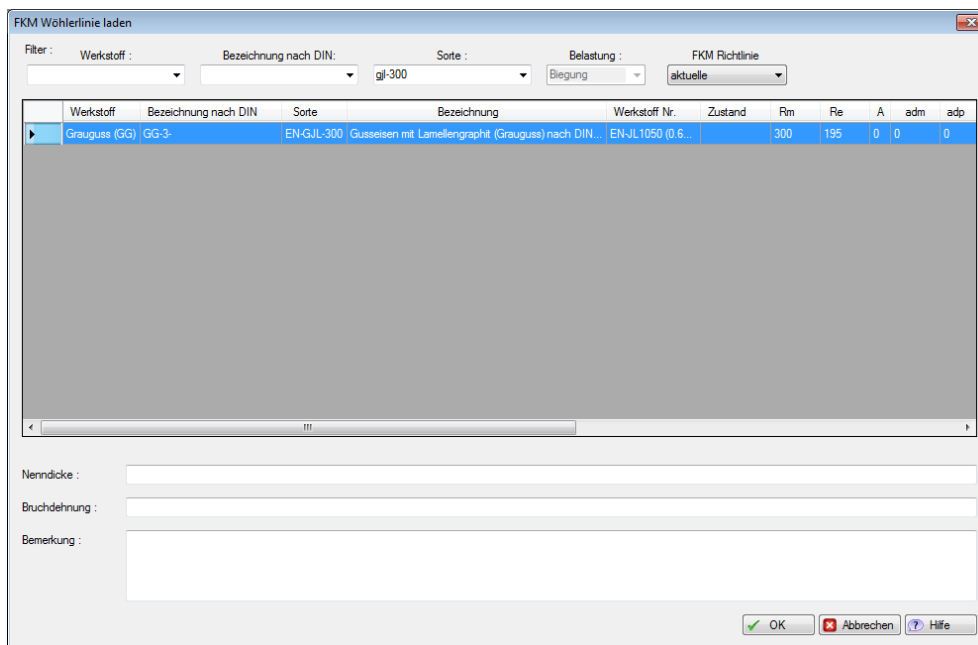
Menü **Datei/ Neu (FKM Festigkeitsnachweis)...**

Der Anwender wählt einen Dateinamen für das winLIFE Projekt, z.B. eignet sich: *Verdichterflansch\_FKM.wlf*.

Als nächstes wird der Werkstoff im Menü *Wöhlerlinie* festgelegt. Der Werkstoff EN-GJL-300 liegt in der winLIFE 4.0 2018 FKM Datenbank vor und kann wie folgt gewählt werden:

Menü **Wöhlerlinie / Laden FKM...**

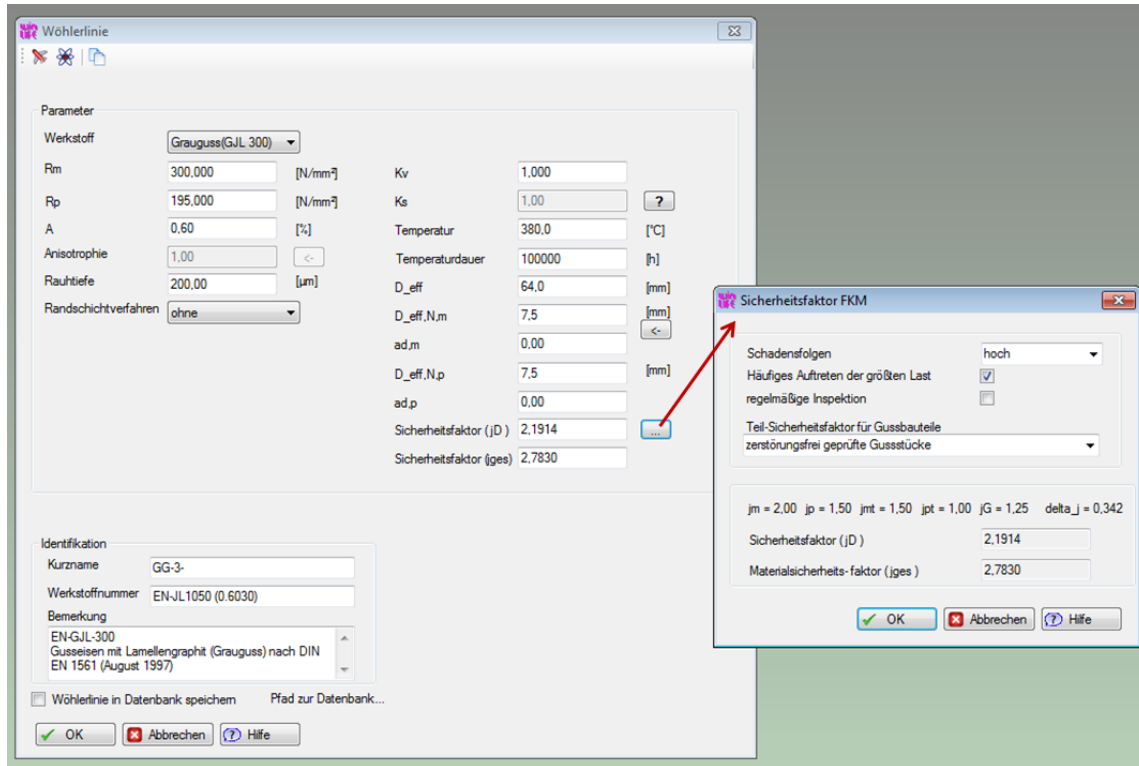
Daraufhin öffnet sich ein neues Fenster und es wird im Feld *Sorte* der Werkstoff: EN-GJL-300 eingetragen. Der gesuchte Werkstoff erscheint nun und man wählt diesen aus durch Klicken auf OK.



Werkstoffauswahl aus der FKM Datenbank



Die zu ergänzenden Werkstoffangaben können der FKM Richtlinie entnommen werden. Der Sicherheitsfaktor wird hier durch entsprechende Angaben im gezeigten Fenster bestimmt. Schließlich ergibt sich folgende Abbildung für die Eingaben zu der Wöhlerlinie.

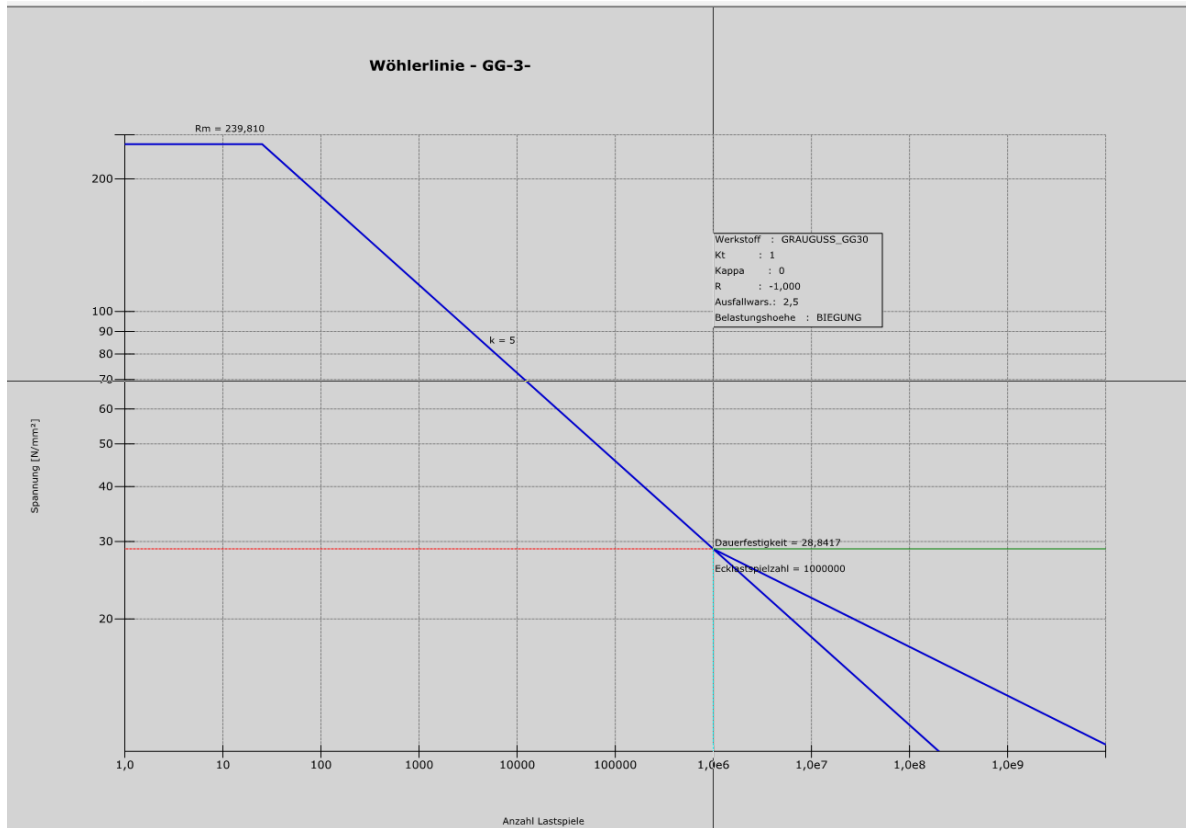


## Werkstoffangaben

Aus den gerade getätigten Eingaben wird eine Wöhlerlinie erzeugt. Über die Befehlsfolge

Menü **Wöhlerlinie / Wöhlerlinie**

wird diese gezeigt. Bei Bedarf kann die Wöhlerlinie skaliert werden. Dazu wird die rechte Maustaste gedrückt, wenn man sich über eine Achse befindet, und aus dem Kontextmenü *Min/Max-Wert* gewählt.

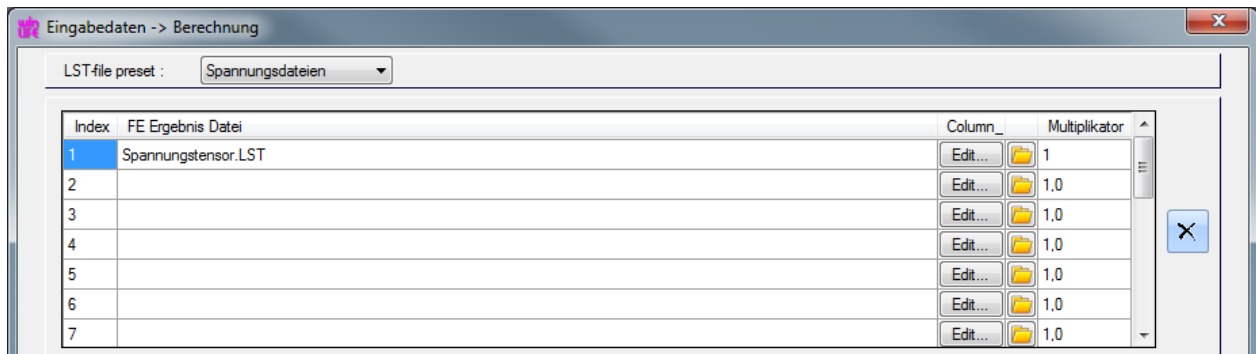


## Wöhlerlinie für das Material EN-GJL-300 (GG-30)

Nun folgt der Schritt der Belastungseingabe:

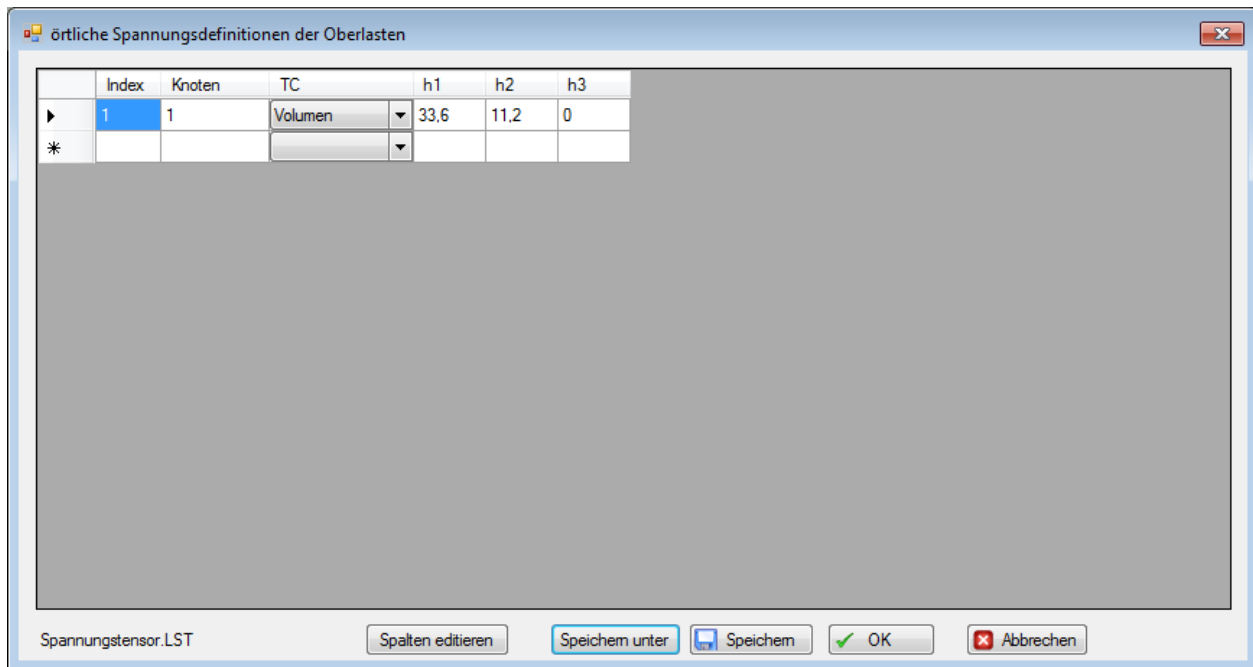
Menü **Berechnung** das unten dargestellte Bild erscheint

Hier werden also die Angaben zur Belastung gemacht.



Angaben im Dialog Berechnung

Zunächst erfolgt die Eingabe der örtlichen Spannungen am Nachweispunkt. Dazu wird die vorhandene Datei *Spannungstensor.LST* geöffnet, indem in der ersten Zeile auf die Schaltfläche mit dem Ordnersymbol geklickt wird (obere Abbildung). In dieser Datei sind folgende Hauptspannungen angegeben:

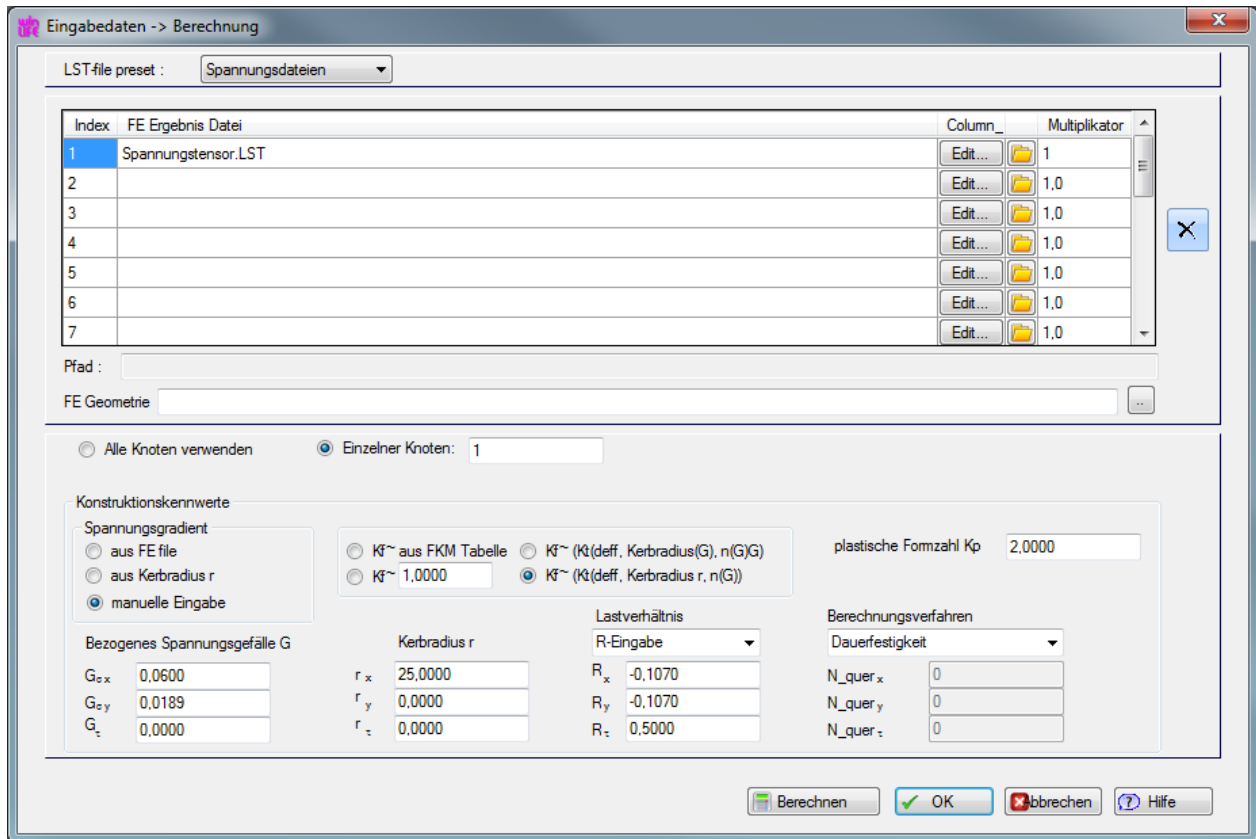


### Angabe der örtlichen Spannungen

Die Datei enthält also die auftretenden Spannungen am Nachweispunkt. Im winLIFE 4.0 2018 Beispiel 28 wird die Erstellung und Änderung einer solchen LST-Datei beschrieben.

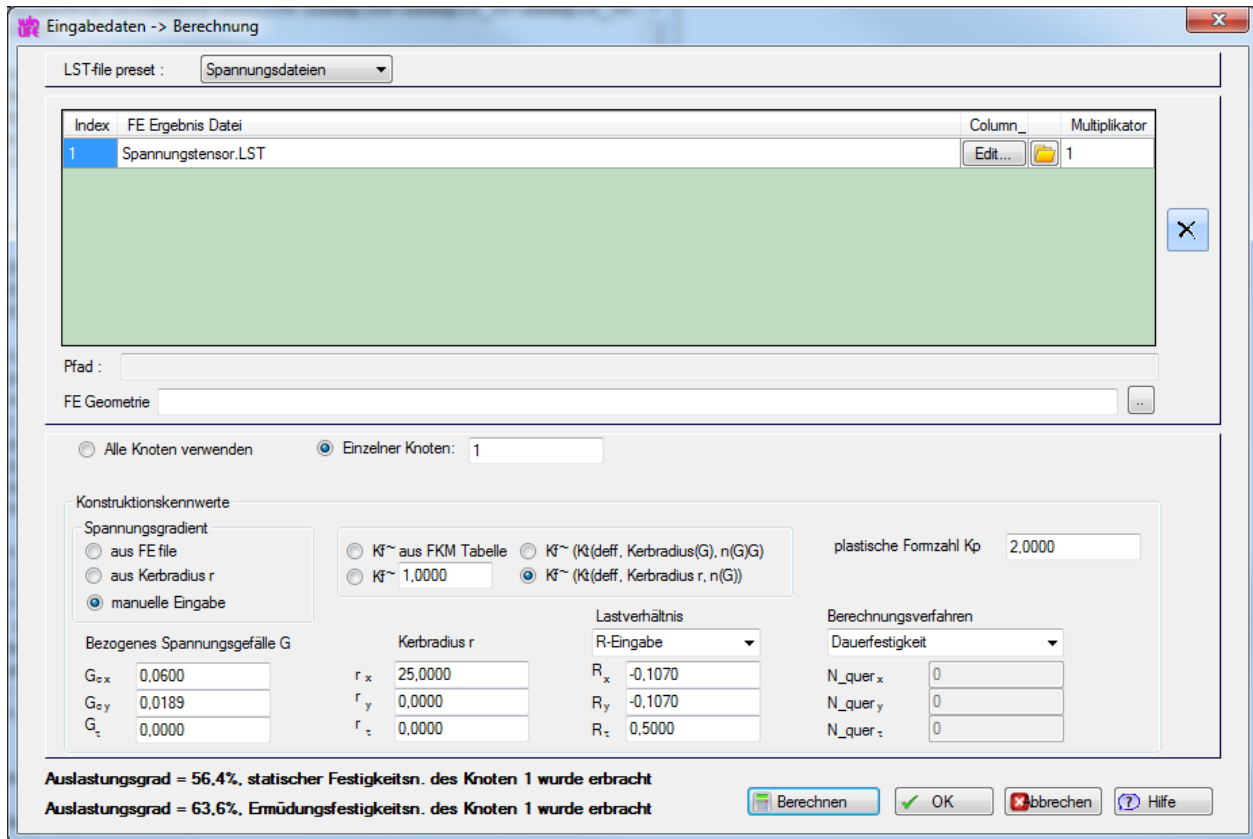
Nun werden die weiteren Angaben im unten gezeigten Fenster getätigt.

Der Wert für die plastische Formzahl  $K_p$  braucht laut FKM nicht berechnet werden - damit wird hier für die plastische Stützzahl die Plastizitätszahl des Werkstoffs verwendet. Als weitere Eingaben folgen die Spannungsgefälle, die Spannungsverhältnisse und das Berechnungsverfahren, hier *Dauerfestigkeit*. Schließlich sollte das Fenster so ausgefüllt sein wie die untere Abbildung zeigt.



## Berechnungsangaben

Nun wird die Festigkeitsberechnung durchgeführt durch Klicken auf den Button Berechnen. Es ergeben sich die Auslastungsgrade für die statische Festigkeit von 56,4% und für die Ermüdungsfestigkeit von 63,6%. Diese Ergebnisse werden im Fenster links eingeblendet (siehe bitte Abbildung unten).



Berechnungsangaben und Ergebnisse der Bauteilbelastung

## 7.5. Ergebnis

Das Protokoll in winLIFE FKM QUICKCHECK zeigt neben den Auslastungsgraden für die statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit auch Zwischenergebnisse der Berechnung. Der winLIFE Anwender kann somit die Berechnungen gut nachvollziehen und die Zwischenschritte mit den Gleichungen aus der FKM-Richtlinie gegenüberstellen.

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Ergebnis-Protokoll für den statischen Festigkeitsnachweis. Dabei ist ganz unten der Auslastungsgrad aufgeführt, hier 56,4%.

```

Protokoll

Werkstoffkennwerte
Rm: 2.39810E+02 Kdm: 7.99367E-01 KA: 1.00000E+00 RmN: 3.00000E+02 (3.2.1)
Rp: 1.55877E+02 Kdp: 7.99367E-01 KA: 1.00000E+00 RpN: 1.95000E+02
Spannungen aus der Summe der Lastfälle
h1: 3.36000E+01 h2: 1.12000E+01 h3: 0.00000E+00

Statischer Festigkeitsnachweis für den Knoten 1
Temperaturfaktor
KT,m = KT,p: 7,68960E-01 (3.2.22 - 3.2.27)
KTt,m: 5,12067E-01 (3.2.29)
KTt,p: 5,12067E-01 (3.2.29)
Hauptspannungen
h1: 3.36000E+01 h2: 1.12000E+01 h3: 0.00000E+00
hydrostatische Spannung sigma_H
sigma_H: 1.49333E+01 (3.1.11)
Duktilitätsfaktor q, Festigkeitsfaktor f_sigma, Gussfaktor KNL
q: 1.00000E+00 f_sigma: 1.00000E+00 KNL: 1.05000E+00 (Zug)
q: 1.00000E+00 f_sigma: 2.50000E+00 KNL: 9.50000E-01 (Druck)
Vergleichsspannung
sigma_v: 3.20000E+01 (3.1.5)
Mehrachsigkeit
h: 5.03953E-01 sigma_H: 1.49333E+01 sigma_GH: 2.96324E+01 (3.1.10)
plastische Stützzahl - npl
eps_ref: 2.40000E-03 A: 6.00000E-01 (3.3.5)
eps_ertr: 1.60031E-03 eps_0: 1.55877E-03 (3.3.3)
npl: 1.01324E+00 E: 1.00000E+05 Kp: 2.00000E+00 (3.3.2)
Bauteilfestigkeit - sigma_SK
sigma_SK: 1.57940E+02 (3.4.1)
Vergleichsauslastungsgrad - aSK
aSK: 5.63859E-01 sigma_v: 3.20000E+01 sigma_SK: 1.57940E+02 jges: 2.78300E+00 (3.6.1)
Auslastungsgrad = 56.4%, statischer Festigkeitsnachweis wurde erbracht.

```

## Protokoll der Festigkeitsberechnung, statischer Nachweis

Nun wird der Ausschnitt aus dem Ergebnis-Protokoll gezeigt, der für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit relevant ist. Der Auslastungsgrad bezogen auf die Dauerfestigkeit beträgt 63,6% wie man der untersten Zeile entnehmen kann.

```

Protokoll

Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Knoten 1
Bauteil-Normwerte
sigma_W,zd: 8.15354E+01 fW,sigma: 3.40000E-01 Rm: 2.39810E+02 (4.2.1)
Temperaturfaktor
KT,D: 8.55600E-01 (4.2.4)
Stützzahlen nach Stieler
n_sigma_1: 1.17915E+00 G_sigma_1: 6.00000E-02 aG: -5.00000E-02 bG: 3.20000E+03 (4.3.7)
n_sigma_2: 1.05643E+00 G_sigma_2: 1.89000E-02 aG: -5.00000E-02 bG: 3.20000E+03
Schätzwert der Kerbwirkungszahl
Kf~_sigma_1: 1.07901E+00 Kt_sigma_1: 1.27232E+00 (4.3.2)
Kf~_sigma_2: 1.00000E+00 Kt_sigma_2: 1.00000E+00
Rauheitsfaktor
KR sigma: 9.05994E-01 aR_sigma: 6.00000E-02 r_t: 2.00000E+02 Rm,N,min: 1.00000E+02 (4.3.21)
Konstruktionsfaktoren
KWK_sigma_1: 9.06949E-01 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.02500E+00 (4.3.1)
KWK_sigma_2: 1.01932E+00 KV: 1.00000E+00 KS: 1.00000E+00 KNL,E: 1.02500E+00
Bauteil-Wechselfestigkeit
sigma_1 WK: 8.99008E+01 (4.4.1)
sigma_2 WK: 7.99902E+01
Mittelspannungsempfindlichkeit
M_sigma: 5.00000E-01 aM: 0.00000E+00 bM: 5.00000E-01 (4.4.5)
Mittelspannungsfaktor
KAK_sigma_1: 7.12584E-01 R: -1.07000E-01 sm/sa: 8.06685E-01 (4.4.8 - 4.4.12)
KAK_sigma_2: 7.12584E-01 R: -1.07000E-01 sm/sa: 8.06685E-01
Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit
sigma_1 AK: 6.40619E+01 (4.4.4)
sigma_2 AK: 5.69998E+01
ertragbare Nennwerte der Amplitude
sigma_1 BK: 6.40619E+01 KBK_sigma: 1.00000E+00 (4.4.38)
sigma_2 BK: 5.69998E+01 KBK_sigma: 1.00000E+00
Maximalwert der Amplitude
sigma_BKmax: 1.18455E+02 (4.4.40)
Nachweis - einzelne Spannungsarten jD: 2.19140E+00
aBK_sigma_1: 6.36178E-01 sa: 1.85976E+01 sigma_BK: 6.40619E+01 (4.6.3)
aBK_sigma_2: 2.38333E-01 sa: 6.19920E+00 sigma_BK: 5.69998E+01
Nachweis - zusammengesetzte Spannungsarten
aBK_sigma_v: 6.36178E-01 aNH: 6.36178E-01 aGH: 5.56689E-01 q: 1.00000E+00 (4.6.5)
Auslastungsgrad = 63.6%, Ermüdungsfestigkeitsnachweis wurde erbracht.

```

## Protokoll der Festigkeitsberechnung, Ermüdungsnachweis







# 8. Beispiel 18 / Dauerfestigkeitsnachweis (winLIFE QUICK CHECK)

---

## 8.1. Ablaufbeschreibung an einem Beispiel

---

Hinweis: Die Daten dieses Beispiels – auch die Daten des FEMAP/NASTRAN Modells – sind unter Beispiel 18 auf der winLIFE-CD zu finden. Unterverzeichnis `|examples_wl_30|examp_18\LST-Dateien`

---

Die Erstellung des FE-Modells in FEMAP wird hier nicht beschrieben. Die dabei erzeugten Daten sind aber alle auf der winLIFE-CD gespeichert, so dass dieses Beispiel in winLIFE ohne Vorarbeiten nachvollzogen werden kann.

### 8.1.1. Grundregeln bei der Bedienung von winLIFE QUICK CHECK

---

Regel 1:

Das Menü ist von links nach rechts durchzuarbeiten.

Regel 2:

Nur aktive Menü-Punkte können vom Benutzer betätigt werden (aktiv=schwarz, inaktiv = grau). Auf diese Weise sollen unzulässige Eingaben vermieden werden.

---

### 8.1.2. Start von winLIFE

Durch Doppelklick auf das winLIFE-Icon starten Sie winLIFE. Es erscheint das folgende Fenster. In der oberen Menüleiste ist nur der Punkt **Datei** aktiv (schwarze Farbdarstellung = aktiv, graue Farbdarstellung = inaktiv).

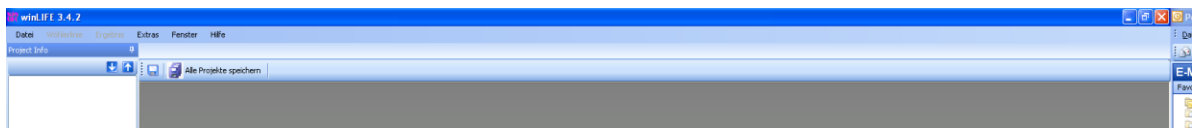


Bild 8-1: obere Menüleiste von winLIFE nach dem Start des Programms

### 8.1.3. Erstellen eines Projektes

Wählen Sie aus dem Menü: **Datei / Neu (Dauerfestigkeit)** und geben Sie einen Namen für Ihr Projekt z.B. projekt\_1 ein.

Der eingegebene Projektname erscheint danach in der Statuszeile oben und der Menüpunkt Wöhlerlinie ist aktiviert (scharze Farbdarstellung = aktiv, graue Farbdarstellung = inaktiv). In dem folgenden Bild ist die Reihenfolge der Benutzeraktivitäten nummeriert.

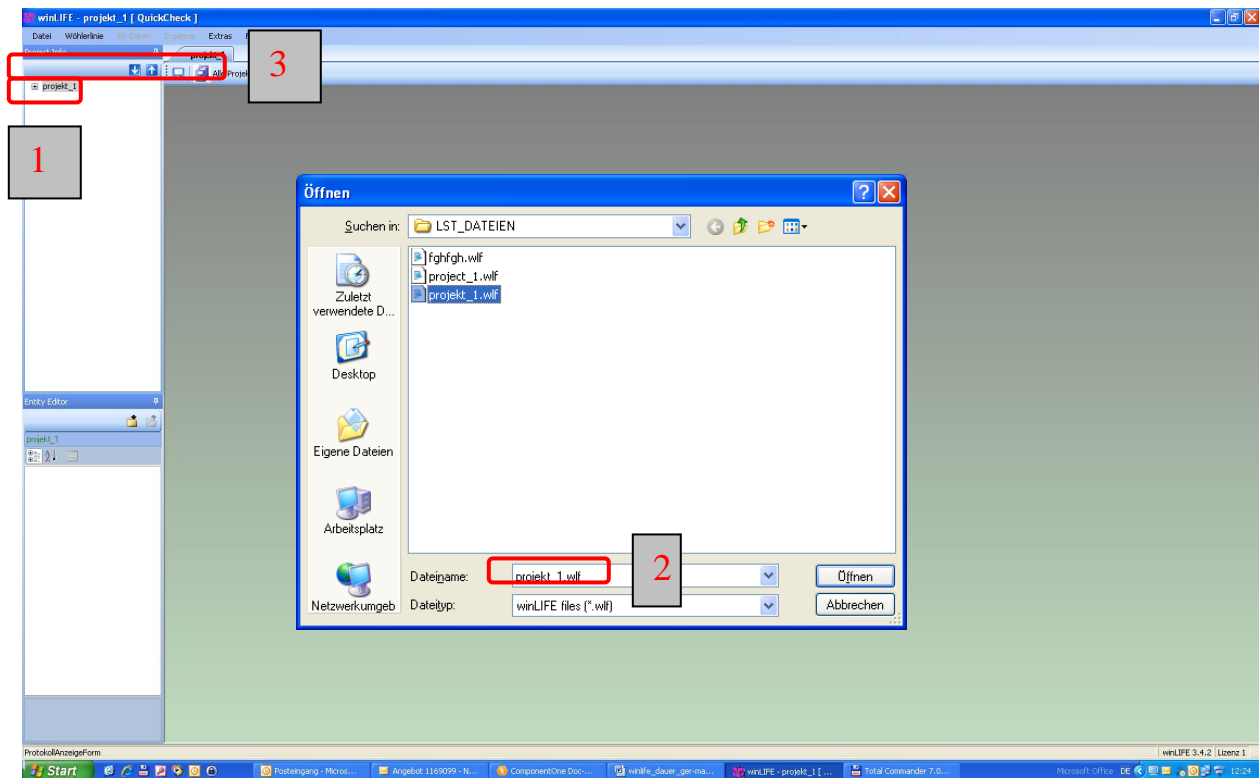
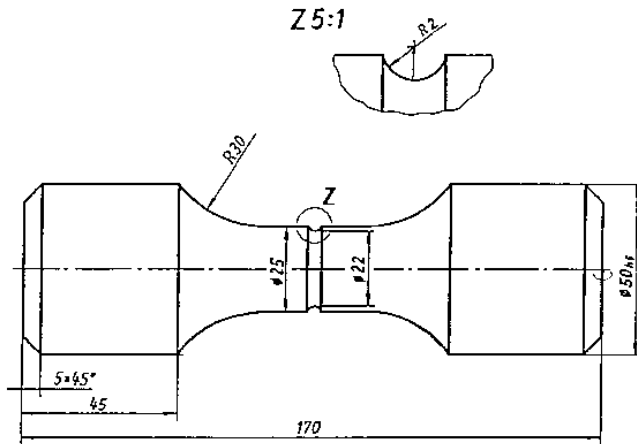


Bild 8-2: : Eingabe des Namens eines Quick Check Projekts

## 8.2. Aufgabenstellung

### 8.2.1. Bauteilgeometrie

Es soll für ein Bauteil, dessen Konstruktionszeichnung mit Bemaßung in dem folgenden Bild dargestellt ist, ein Dauerfestigkeitsnachweis erfolgen. Aus didaktischen Gründen wird dieser Nachweis zunächst für die einzelnen Lastfälle separat durchgeführt. Zum Schluß wird die gleichzeitige Wirkung der Lastfälle untersucht.



FE-Modell „ gekerbte Welle“

### 8.2.2. Bauteilbelastung (Einheitslasten)

Die Belastung des feststehenden Bauteils erfolgt durch folgende drei Größen, die jeweils zu einer Nennspannung von  $1\text{N/mm}^2$  in der Kerbe führen.

Lastfall Nr.	Belastungsart	Einheitslast, die genau $1\text{ N/mm}^2$ Nennspannung erzeugt.	Zeitlicher Verlauf	Oberlast
1	Zugkraft	Zugkraft in Stirnfläche in x-Richtung $380\text{ N}$	konstant	$380\text{ N} * 20 = 7\,000\text{ N}$
2	Biegung	Moment in y-Richtung auf Stirnfläche $M_y = 1045\text{ Nmm}$	wechselnd	$1045\text{ Nmm} * 40 = 41\,800\text{ Nmm}$
3	Torsion	Moment in x-Richtung $M_x = 2091\text{ Nmm}$	schwellend	$2091\text{ Nmm} * 30 = 62\,730\text{ Nmm}$

### 8.2.3. Werkstoffdaten

Werkstoffbezeichnung	42 CrMoS 4V
Mechanische Werte	
Zugfestigkeit $R_m$	920 MPa
0,2 % Dehngrenze	743 MPa
E-Modul	210 MPa
Beanspruchungsart für Generierung:	Biegung (bei Überlagerung mehrerer Lastfälle wird Biegung empfohlen)

#### Bauteildaten

Oberfläche, Rautiefe Rz	8 $\mu\text{m}$	
Randschichtfaktor Kv	1,0	=keine Oberflächenverfestigung
Schutzschichtfaktor Ks	1,0	=keine Schutzschicht
Temperatur	20,0	
$D_{\text{eff}}=D_{\text{effN}}$	7,5	statistischer Größeneinfluß wird ignoriert
adm	0,01	technologischer Größeneinfluß wird ignoriert
Anisotropie	1	isotropes Verhalten
$K_{\text{NL}}$	1	lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten
Sicherheitsfaktor	1	kein Sicherheitsaufschlag

---

## 8.3. Generierung der Wöhlerlinie

Auf Grund der gegebenen statischen Werkstoffkennwerte und der Bauteileigenschaften kann eine Wöhlerlinie generiert werden. Dies erfolgt nach der FKM-Richtlinie. Da der interessierende Werkstoff nicht in der FKM-Datenbank vorliegt, wird hier gezeigt, wie die Eingabe erfolgt. Dabei werden auch die Eingabewerte kurz erläutert.

Durch Anklicken von

***Wöhlerkurve / EDIT professional***

öffnet sich eine Eingabemaske. Oben links in der Maske wird **Generator** angeklickt und die Maske erweitert sich.

---

Hinweis: In der Maske sind Daten aus der letzten Eingabe vorhanden. Diese werden durch die Eingaben des Benutzers überschrieben.

---

Es sind die in der Maske rechts rot eingerahmten Daten bekannt, die nun in die Maske eingegeben werden müssen.

**Wöhlerlinie**

Generator >> Ausfallwahrsch. >> <<

Bauteilwöhlerlinie Nenn-/Kerbspannungskonzept (R=-1)

Rm (Biegung)	920.000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Re (Zug-Druck)	743.000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Steigung (*)	5.000	
Steigung 2 (*)	5.000	
Zug/Druck w.	414.000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Dauerfestigkeit (*)	384.822	[N/mm <sup>2</sup> ]
Dauerfestigkeit 2 (*)	384.822	[N/mm <sup>2</sup> ]
Ecklastspielzahl (*)	1000000	
Ecklastspielzahl 2 (*)	1000000	
Mittelspannungsempf. (*)	0,2220000	
Belastung (*)	Biegung	
Werkstoff	Stahl	
Ausfallwahrscheinlichkeit	2,5000	[%]
ZDw/Tw (*, nur MUX)	1,73310	

Identifikation

Kurzname: bsp 18qc

Werkstoffnummer: 1.7227

Bemerkung: 42CrMoS4  
Vergütungsstahl im vergüteten Zustand nach DIN EN 10 083-1 (Oktober 1996)

Wöhlerlinie in Datenbank speichern Pfad zur Datenbank...

OK Abbrechen Hilfe

Parameter

Berechnungsmethode	FKM	
Werkstoff	Stahl	
Belastung	Biegung	
Randschichtverfahren	ohne	
Rm	920.000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Re	743.000	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\chi^*$	0,00000	...
$\chi^*$ (d)	0,00000	
Kf	2,0000	
Rauhtiefe	8,00	[ $\mu$ m]
Kv	1,000	
Ks	1,00	?
Temperatur	20,0	[°C]
D_eff	7,5	[mm]
D_effN	7,5	[mm]
adm	0,01	<
Anisotropie	1,00	<
K_NL	1,000	
Sicherheitsfaktor (jD)	1,0000	...

generieren  Protokoll anzeigen

## Eingabe der Wöhlerlinie

Klickt man auf **generieren**, so werden die Daten der Wöhlerkurve (linke Seite der Maske) erzeugt. Ein Protokoll wird ausgegeben, aus dem die Einzelheiten der Generierung hervorgehen.

```

Protokoll-Generierung der Wöhlerlinie nach FKM

K_d,m      = 1,000 (D_eff < D_eff,N,m)

R_m        = 920,000
           = R_m,N * K_A * K_d,m
           = 920,000 * 1,000 * 1,000

K_T,D      = 1,000

Sigma_W,zd  = 414,000
           = f_W,sigma * R_m * K_T,D
           = 0,450 * 920,000 * 1,000

K_R,sigma  = 0,868 (Zug-Druck / Biegung)
           = 1 - alpha_F,sigma * lg(R_z[mue m]) * lg(2*R_m / R_m,N,min)
           = 1 - 0,220 * lg(8,000) * lg(2*920,000/400,000)

n_sigma    = 1,000 (Zug-Druck / Biegung)
           = 1 + G_0 * 10^-(a_G-0,5+R_m/b_G)
           = 1 + 0,000 * 10^-(0,500-0,5+920,000/2700,000)

K_WK,sigma = 1,076
           = 1/n_sigma * (1 + 1/K_fu * (1/K_R - 1)) * 1/(K_V * K_S) =
           = 1/1,000 * (1 + 1/2,000 * (1/0,868 - 1)) * 1/(1,000 * 1,000)

S_WK       = 384,822
           = sigma_W,zd / K_WK,sigma / (J_C / K_T,D)
           = 414,000 / 1,076 / (1,000)

M_sigma    = 0,2220000
           = a_M * R_m * 10^-3 + b_M
           = 0,350 * 920,000 * 10^-3 + -0,100

k_sigma    = 5,000

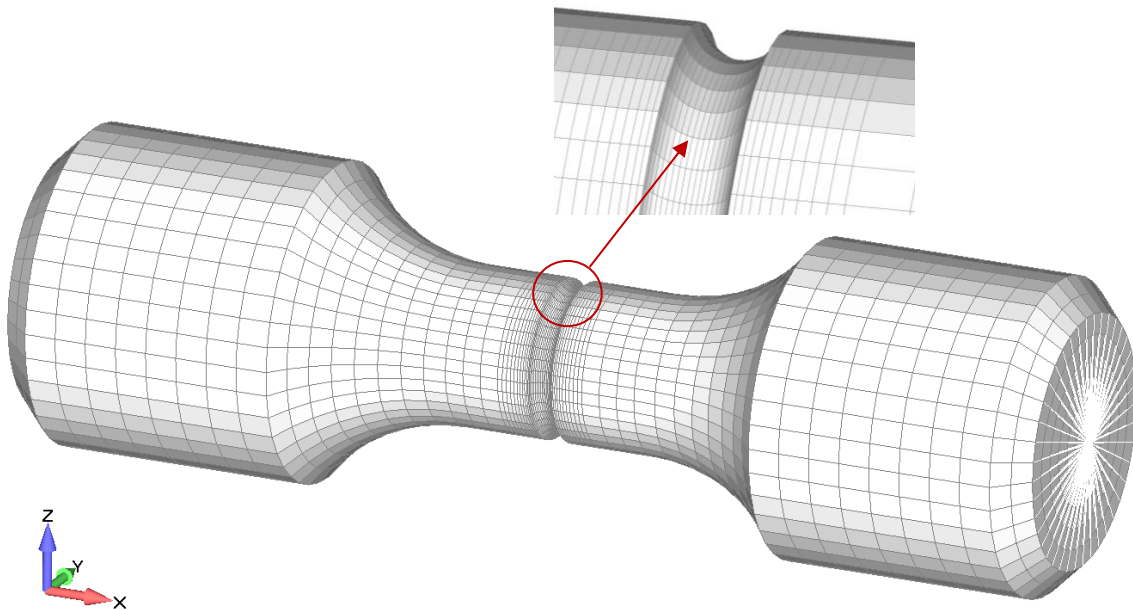
N_D        = 1000000,000

```

Protokoll der Generierung der Wöhlerkurve

## 8.4. Modellbildung

Das Modell wurde so realisiert, dass eine genügend feine Vernetzung in der Kerbe erfolgte. Das folgende Bild zeigt das FE-Modell mit dem Netz.



FE-Modell mit feinem Netz in der Kerbe

## 8.5. Ergebnisse für Spannungen und Auslastungsgrad der einzelnen FE - Berechnungen mit Femap / Nastran

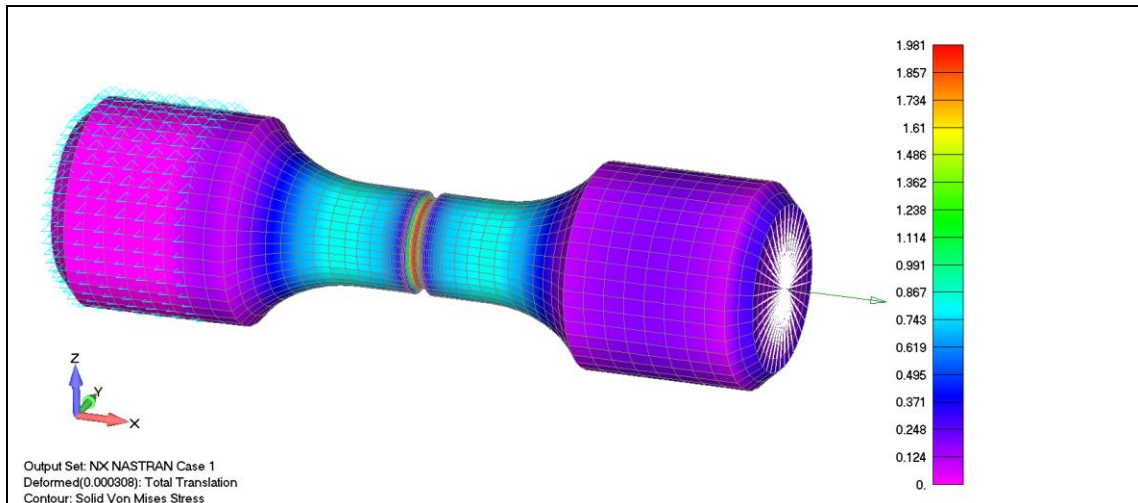
Nur zum Verständnis werden hier zunächst die einzelnen Lastfälle separat dargestellt, da man deren Ergebnisse einfacher nachvollziehen kann.

### 8.5.1. Lastfall Zug

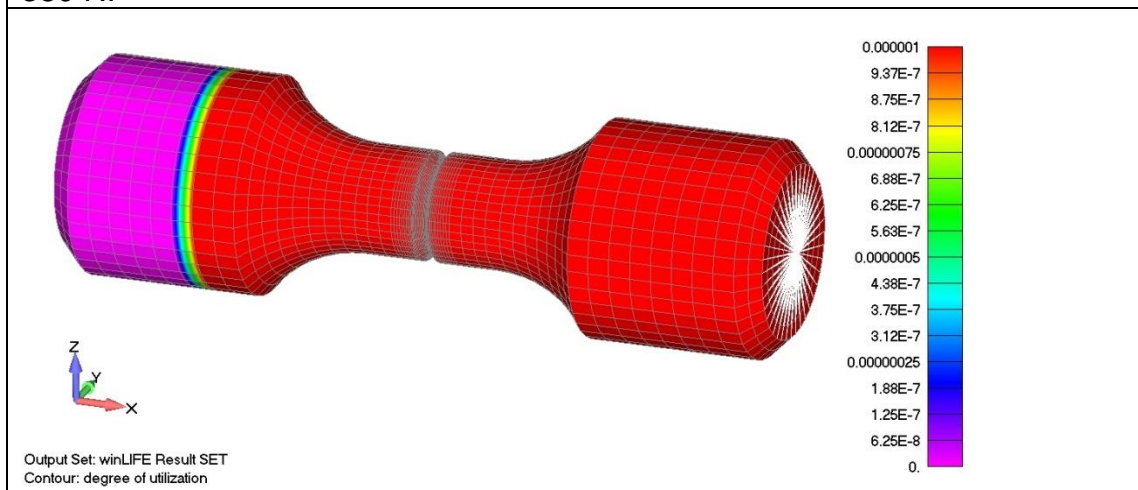
Die Verteilung der von Mises Vergleichsspannung ist in dem folgenden Bild dargestellt. Die Nennspannung in der Kerbe beträgt  $1 \text{ N/mm}^2$ , die Belastung  $F_x$  beträgt  $350 \text{ N}$ .

Index	FE Ergebnis Datei	FE Spannungsgradient	Spannungsverhältnis	R_Wert	Multiplikator
1	gekerbteWelle-Zug.LST	<input type="checkbox"/>	konstant	1,0	20
2		<input type="checkbox"/>	schwelend	0,0	1,0
3		<input type="checkbox"/>	schwelend	0,0	1,0
4		<input type="checkbox"/>	schwelend	0,0	1,0
5		<input type="checkbox"/>	schwelend	0,0	1,0
6		<input type="checkbox"/>	schwelend	0,0	1,0
7		<input type="checkbox"/>	schwelend	0,0	1,0

Eingabe der FE-Datei mit Belastungsart und Multiplikator



Die Nennspannung in der Kerbe beträgt  $1 \text{ N/mm}^2$ , die Belastung  $F_x$  beträgt  $380 \text{ N}$ .



Der Auslastungsgrad für konstante Zugspannung in der Kerbe =  $20 \cdot 1 \text{ N/mm}^2$ , bewirkt durch die Belastung  $F_x = 380 \cdot 20 \text{ N}$ . Man beachte, dass die Auslastung praktisch gleich Null ist, da keine Spannungsschwingweite auftritt.



## 8.5.2. Lastfall Biegung

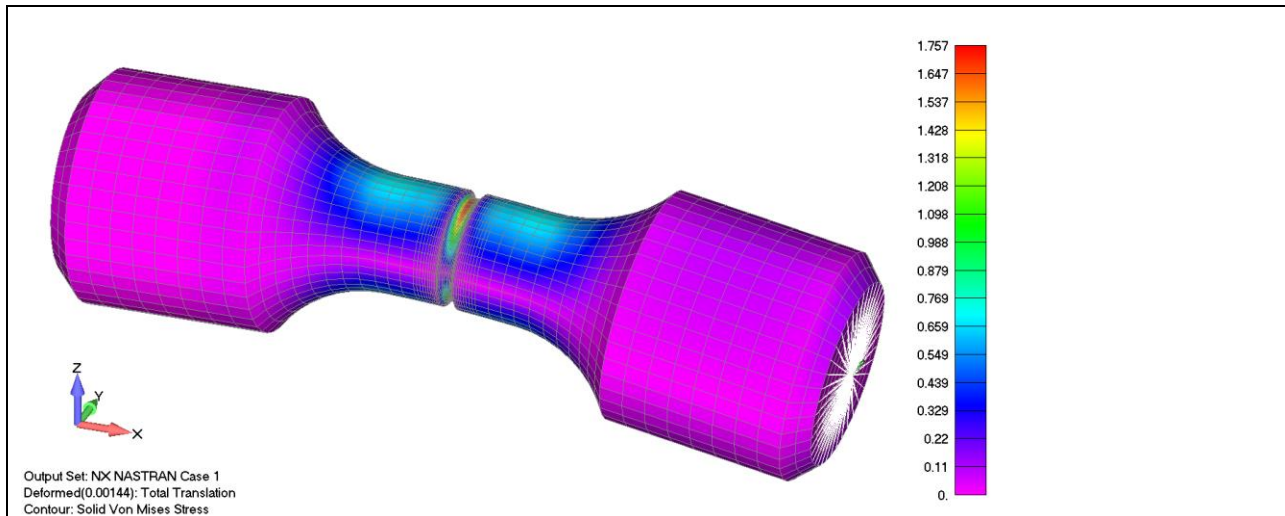
Die Verteilung der von Mises Vergleichsspannung ist in dem folgenden oberen Bild dargestellt. Die Nennspannung in der Kerbe beträgt  $1\text{N/mm}^2$ , die Belastung  $M_y$  beträgt  $1045\text{ Nmm}$ .



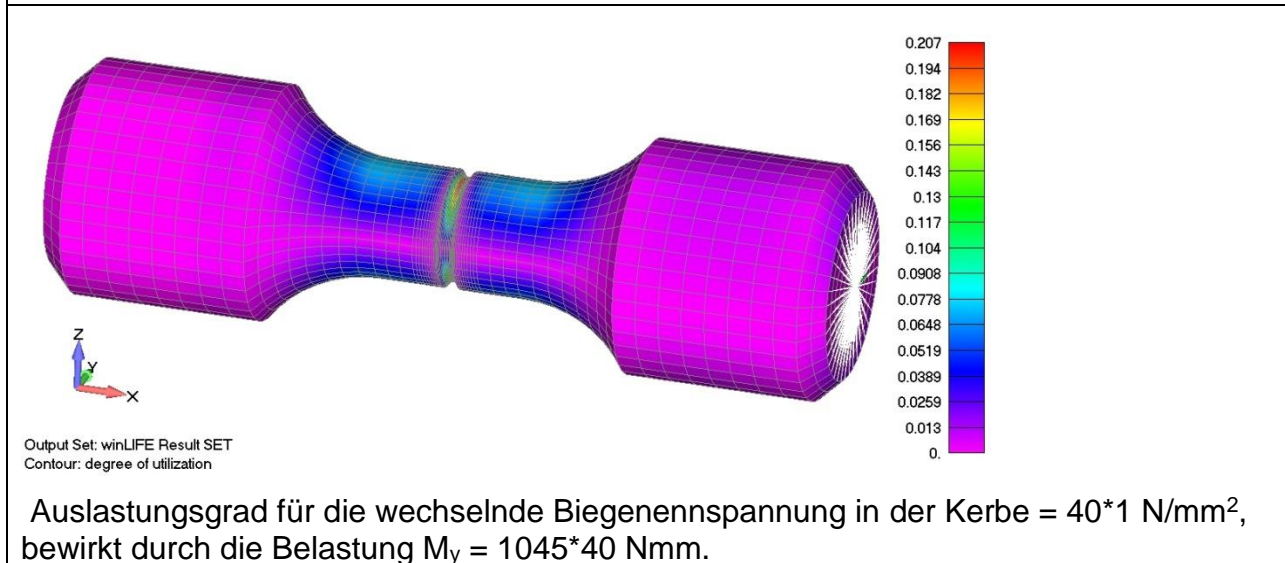
The screenshot shows a dialog box titled 'Menu FE Schnittstelle' with a table for defining finite element results. The table has five columns: 'Index', 'FE Ergebnis Datei', 'FE Spannungsgradient', 'Spannungsverhältnis', 'R\_Wert', and 'Multiplikator'. The first row is selected and contains the following data: Index 1, FE Ergebnis Datei 'gekerbteWelle-Biegung.LST', FE Spannungsgradient (checkbox), Spannungsverhältnis 'wechselnd', R\_Wert '-1.0', and Multiplikator '40'. Rows 2 through 7 are empty, with the 'Spannungsverhältnis' column set to 'schwellend' and 'R\_Wert' set to '0.0'.

Index	FE Ergebnis Datei	FE Spannungsgradient	Spannungsverhältnis	R_Wert	Multiplikator
1	gekerbteWelle-Biegung.LST	<input type="checkbox"/>	wechselnd	-1.0	40
2		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
3		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
4		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
5		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
6		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
7		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0

Eingabe der FE-Datei mit Belastungsart und Multiplikator



Biegeennspannung in der Kerbe von  $1\text{N/mm}^2$ , bewirkt durch die Belastung  $M_y = 1045\text{ Nmm}$ .



Auslastungsgrad für die wechselnde Biegeennspannung in der Kerbe =  $40 \cdot 1\text{ N/mm}^2$ , bewirkt durch die Belastung  $M_y = 1045 \cdot 40\text{ Nmm}$ .

### 8.5.3. LastfallTorsion

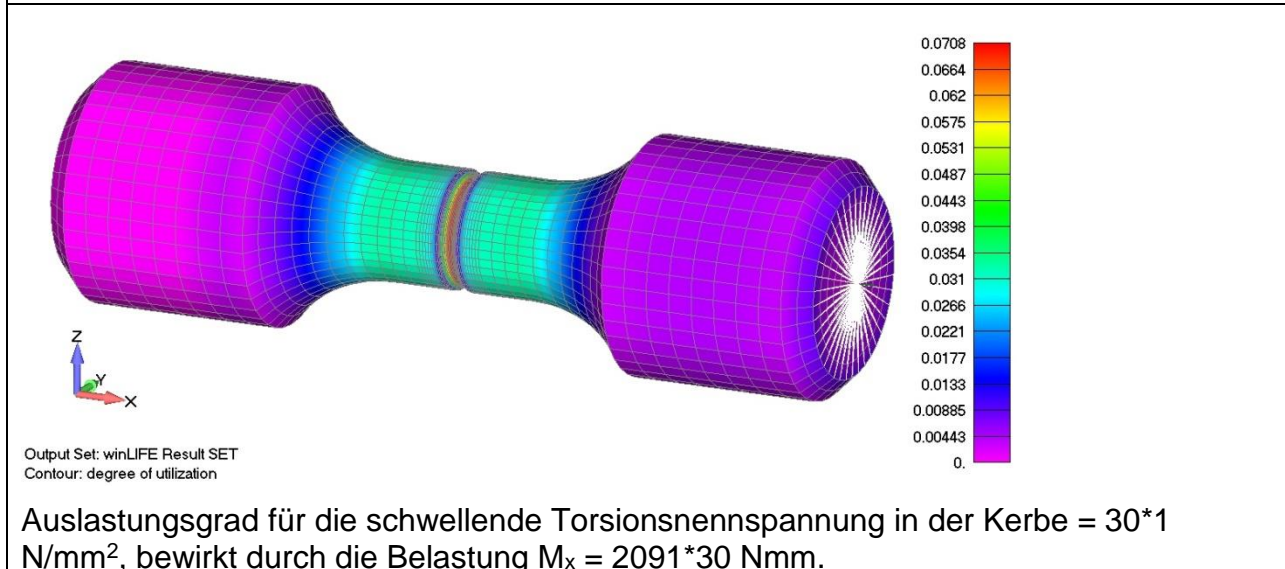
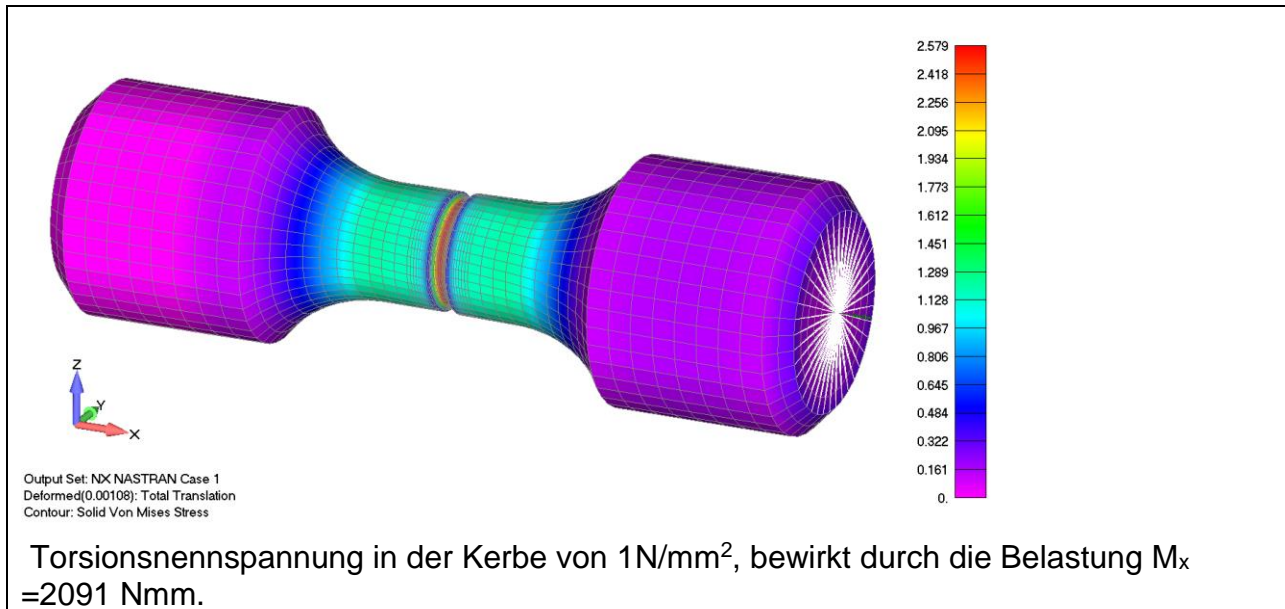
Die Verteilung der von Mises Vergleichsspannung ist in dem folgenden Bild dargestellt. Die Nennspannung in der Kerbe beträgt  $1\text{N/mm}^2$ , die Belastung  $M_x$  beträgt  $2091\text{ Nmm}$ .



The screenshot shows a dialog box titled "Menü FE Schnittstelle" with a table for inputting FE results. The table has five columns: "Index", "FE Ergebnis Datei", "FE Spannungsgradient", "Spannungsverhältnis", "R\_Wert", and "Multiplikator".

Index	FE Ergebnis Datei	FE Spannungsgradient	Spannungsverhältnis	R_Wert	Multiplikator
1	gekerbteWelle-Torsion.LST	<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	30
2		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
3		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
4		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
5		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
6		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0
7		<input type="checkbox"/>	schwellend	0.0	1.0

Eingabe der FE-Datei mit Belastungsart und Multiplikator



## 8.6. Dauerfestigkeitsnachweis

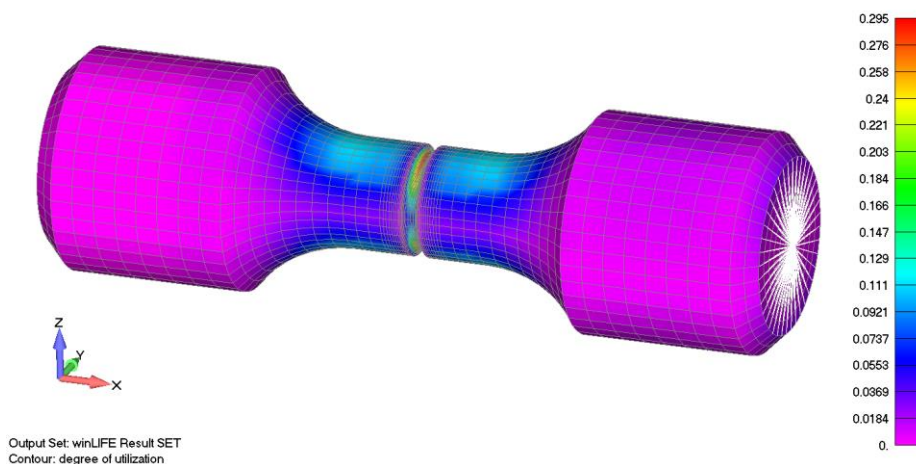
### 8.6.1. Zusammenwirken aller Lastfälle

Das Zusammenwirken aller drei Lastfälle wird dadurch erreicht, dass in der Eingabemaske die drei Belastungen gleichzeitig gewählt werden.

Index	FE Ergebnis Datei	FE Spannungsgradient	Spannungsverhältnis	R_Wert	Multiplikator
1	gekerbteWelle-Zug_LST	<input type="checkbox"/>	konstant	1,0	20
2	gekerbteWelle-Biegung_LST	<input type="checkbox"/>	wechselnd	-1,0	40
3	gekerbteWelle-Torsion.lst	<input type="checkbox"/>	schwellend	0,0	30
4		<input type="checkbox"/>	schwellend	0,0	1,0
5		<input type="checkbox"/>	schwellend	0,0	1,0
6		<input type="checkbox"/>	schwellend	0,0	1,0
7		<input type="checkbox"/>	schwellend	0,0	1,0

## Eingabe der FE-Datei mit Belastungsart und Multiplikator

Das Zusammenwirken der drei Lastfälle wird durch den sich ergebenden Auslastungsgrad gekennzeichnet, der in folgendem Bild angegeben ist. Der Auslastungsgrad gleich 1 würde bedeuten, dass die Dauerfestigkeit erreicht ist. Der hier erreichte Wert von 0,295 besagt, dass die Dauerfestigkeit zu 29,5 % ausgenutzt wird. Die Sicherheit gegen Dauerfestigkeit entspricht dem Kehrwert des Auslastungsgrades und beträgt damit  $1/0,295 = 3,38$ .



Auslastungsgrad für alle drei Belastungen unter der Annahme der ungünstigsten Überlagerung.

Diese Ergebnisse können auch aus dem Protokoll entnommen werden, das am Ende für den kritischen Knoten alle Ergebnisse der Kombinationen darstellt. Die Kombination mit der höchsten Schädigung wird in der zweiten Spalte mit 5 Sternen markiert. In unserem Fall lesen wir in der Spalte Auslastungsgrad 0,295 ab, was auch in dem Ergebnisplot als Maximalwert zu finden ist.

t / QuickCheck - Bauteil ] - [Protokoll]													
Ergebnis Extras Fenster Hilfe													
rmnung_z_05	feder_spannung_z_04	feder_spannung_z_03	hub_mait_2_kopie	ABC	punkt_komma	bez_spg_grad	bez_spg_grad_02	ueber_last_sm_const	ueber_last_smax_const	ueber_last_R_const	ueber_last_smir		
3805	1	V	6.62314E+01	-3.34662E+01	4.98488E+01	1.63826E+01	5.34857E+01	1.38988E-01	7.195	46.3			
19712	1	V	6.62314E+01	-3.34658E+01	4.98487E+01	1.63829E+01	5.34857E+01	1.38988E-01	7.195	134.1			
11465	1	V	6.62313E+01	-3.34662E+01	4.98488E+01	1.63826E+01	5.34857E+01	1.38988E-01	7.195	130.3			
26648	1	V	6.62316E+01	-3.34658E+01	4.98487E+01	1.63829E+01	5.34857E+01	1.38988E-01	7.195	134.1			
12613	1	V	6.60801E+01	-3.32141E+01	4.96471E+01	1.64330E+01	5.32952E+01	1.38493E-01	7.221	134.7			
25606	1	V	6.60802E+01	-3.32139E+01	4.96471E+01	1.64331E+01	5.32952E+01	1.38493E-01	7.221	90.2			
4953	1	V	6.60801E+01	-3.32140E+01	4.96470E+01	1.64330E+01	5.32952E+01	1.38493E-01	7.221	45.3			
18668	1	V	6.60801E+01	-3.32138E+01	4.96470E+01	1.64331E+01	5.32951E+01	1.38493E-01	7.221	135.0			
11081	1	V	6.58787E+01	-3.34462E+01	4.96624E+01	1.62162E+01	5.32624E+01	1.38408E-01	7.225	134.7			
26994	1	V	6.58787E+01	-3.34461E+01	4.96624E+01	1.62163E+01	5.32624E+01	1.38408E-01	7.225	134.7			
3421	1	V	6.58786E+01	-3.34461E+01	4.96623E+01	1.62162E+01	5.32623E+01	1.38408E-01	7.225	134.7			
20058	1	V	6.58786E+01	-3.34461E+01	4.96623E+01	1.62162E+01	5.32623E+01	1.38408E-01	7.225	134.7			
17262	1	V	6.68930E+01	-3.08427E+01	4.88678E+01	1.80252E+01	5.28694E+01	1.37387E-01	7.279	135.4			
24202	1	V	6.68930E+01	-3.08425E+01	4.88677E+01	1.80252E+01	5.28693E+01	1.37386E-01	7.279	103.7			
14129	1	V	6.68918E+01	-3.08438E+01	4.88678E+01	1.80240E+01	5.28691E+01	1.37386E-01	7.279	134.2			
6469	1	V	6.68919E+01	-3.08437E+01	4.88678E+01	1.80241E+01	5.28691E+01	1.37386E-01	7.279	45.8			
24904	1	V	6.61913E+01	-3.17227E+01	4.89570E+01	1.72343E+01	5.27830E+01	1.37162E-01	7.291	133.7			
17965	1	V	6.61913E+01	-3.17227E+01	4.89570E+01	1.72343E+01	5.27830E+01	1.37162E-01	7.291	46.3			
13372	1	V	6.61905E+01	-3.17236E+01	4.89570E+01	1.72334E+01	5.27829E+01	1.37162E-01	7.291	104.7			
5712	1	V	6.61905E+01	-3.17236E+01	4.89570E+01	1.72334E+01	5.27828E+01	1.37162E-01	7.291	134.8			
18662	1	V	6.55902E+01	-3.26021E+01	4.90961E+01	1.64941E+01	5.27576E+01	1.37097E-01	7.294	46.6			
4947	1	V	6.55892E+01	-3.26031E+01	4.90961E+01	1.64931E+01	5.27576E+01	1.37096E-01	7.294	134.2			
25600	1	V	6.55896E+01	-3.26019E+01	4.90958E+01	1.64938E+01	5.27574E+01	1.37096E-01	7.294	133.4			
12607	1	V	6.55886E+01	-3.26029E+01	4.90958E+01	1.64929E+01	5.27572E+01	1.37095E-01	7.294	100.0			
21427	1	V	6.62629E+01	-3.15207E+01	4.88918E+01	1.73711E+01	5.27482E+01	1.37072E-01	7.295	46.8			
28363	1	V	6.62629E+01	-3.15207E+01	4.88918E+01	1.73711E+01	5.27482E+01	1.37072E-01	7.295	89.4			
1873	1	V	6.62620E+01	-3.15214E+01	4.88917E+01	1.73703E+01	5.27479E+01	1.37071E-01	7.295	46.8			
3533	1	V	6.62619E+01	-3.15214E+01	4.88917E+01	1.73703E+01	5.27479E+01	1.37071E-01	7.295	91.3			
20052	1	V	6.52259E+01	-3.30871E+01	4.91565E+01	1.60694E+01	5.27239E+01	1.37009E-01	7.299	47.1			
3415	1	V	6.52250E+01	-3.30880E+01	4.91565E+01	1.60685E+01	5.27237E+01	1.37008E-01	7.299	47.1			
26988	1	V	6.52251E+01	-3.30871E+01	4.91561E+01	1.60690E+01	5.27234E+01	1.37007E-01	7.299	99.0			
11075	1	V	6.52242E+01	-3.30880E+01	4.91561E+01	1.60681E+01	5.27232E+01	1.37007E-01	7.299	90.2			
27680	1	V	6.54913E+01	-3.25630E+01	4.90272E+01	1.64642E+01	5.26822E+01	1.36900E-01	7.305	92.1			
20744	1	V	6.54913E+01	-3.25630E+01	4.90272E+01	1.64642E+01	5.26822E+01	1.36900E-01	7.305	47.3			
10308	1	V	6.54907E+01	-3.25636E+01	4.90272E+01	1.64635E+01	5.26821E+01	1.36900E-01	7.305	90.2			
2648	1	V	6.54907E+01	-3.25637E+01	4.90272E+01	1.64635E+01	5.26821E+01	1.36900E-01	7.305	47.3			
12614	1	V	6.54337E+01	-3.23237E+01	4.88787E+01	1.65550E+01	5.25539E+01	1.36567E-01	7.322	134.1			
25607	1	V	6.54340E+01	-3.23238E+01	4.88786E+01	1.65554E+01	5.25539E+01	1.36567E-01	7.322	133.5			
4954	1	V	6.54335E+01	-3.23238E+01	4.88787E+01	1.65549E+01	5.25539E+01	1.36567E-01	7.322	45.9			
18669	1	V	6.54338E+01	-3.23234E+01	4.88786E+01	1.65552E+01	5.25538E+01	1.36567E-01	7.322	134.5			
11082	1	V	6.50765E+01	-3.27564E+01	4.89164E+01	1.61600E+01	5.25040E+01	1.36437E-01	7.329	134.1			
26995	1	V	6.50767E+01	-3.27561E+01	4.89164E+01	1.61603E+01	5.25040E+01	1.36437E-01	7.329	134.1			
20059	1	V	6.50765E+01	-3.27562E+01	4.89163E+01	1.61601E+01	5.25039E+01	1.36437E-01	7.329	134.1			
3422	1	V	6.50763E+01	-3.27565E+01	4.89164E+01	1.61599E+01	5.25039E+01	1.36437E-01	7.329	134.1			
Kritischer Knoten: 19299 V (Solid)													
Lc	L1	L2	L3	S_Lc1	S_Lc2	Amplitude	Mittelspg.	Ampl.modif.	Auslastungsgr.	Sicherheit			
1-2	1	-1	0	1	-1	1	-3.47866E+01	-6.79699E+01	16.592	51.378	23.069	0.060	16.681
1-3	1	-1	0	1	1	0	-3.47866E+01	1.24873E+02	79.830	45.043	89.829	0.233	4.284
1-4	1	-1	0	1	1	1	-3.47866E+01	1.42416E+02	88.601	53.814	100.548	0.261	3.827
2-3	1	-1	1	1	1	0	-6.79699E+01	1.24873E+02	96.421	28.451	102.737	0.267	3.746
2-4	1	-1	1	1	1	1	-6.79699E+01	1.42416E+02	105.193	37.223	113.456	0.295	3.392
3-4	1	1	0	1	1	1	1.24873E+02	1.42416E+02	8.771	133.644	12.196	0.032	31.554

k\_check\_woma

Protokoll der Berechnung für alle drei Belastungen unter der Annahme der ungünstigsten Überlagerung.







# 9. Literaturverzeichnis

---

## 9.1. Allgemeine Lebensdauerberechnung

[1] DIN 45667 Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen

[2] Haibach: Betriebsfestigkeit, VDI-Verlag; Düsseldorf 1989

[3] Buxbaum, Otto: Betriebsfestigkeit, Verlag Stahl Eisen; Düsseldorf 1986

[4] Westermann-Friedrich: Sonderereigniskollektive, kennzeichnende Zeitfunktionen und Kollektive für Anlagen und Arbeitsprozesse. Forschungsvereinigung Antriebstechnik Heft 274, 1988

[5] Verein deutscher Eisenhüttenleute: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, 2. Auflage; Düsseldorf 1985

[6] Hück, Manfred; Thrainer, Lorenz; Schütz, Walter: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguß und Grauguß, Synthetische Wöhlerlinien, Verein deutscher Eisenhüttenleute Arbeitsgemeinschaft Betriebsfestigkeit, Mai 1981, Bericht ABF 11.

[7] Zammert, W.-U.: Betriebsfestigkeitsberechnung, Vieweg-Verlag; Braunschweig-Wiesbaden 1985, ISBN 3-528-03350-9

[8] Munz, D: Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe, Vortragstexte eines Symposiums der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde, 1984, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V., Adenauerallee 21, Oberursel

[9] Hertel, H.: Ermüdungsfestigkeit der Konstruktion, Springer-Verlag 1969

[10] Gumpert, W.: Höhere Festigkeitslehre, Betriebsfestigkeit, 3. Lehrbrief; Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium Nr.: 02 1205 03 0; Herausgeber: Zentralstelle für das Hochschulfernstudium Dresden

[11] Heuler, P.: Anrißlebensdauer bei zufallsartiger Belastung auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen; Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TH Darmstadt, Heft 40, 1983

- [12] Bergmann, J.: Zur Betriebsfestigkeit gekerbter Bauteile auf der Grundlage der örtlichen Beanspruchungen; Dissertation TH-Darmstadt 1983
- [13] Krüger, Petersen: Simulation und Extrapolation von Rainflow-Matrizen; Bericht Nr. 8 der Arbeitsgruppe Technomathematik des Fachbereichs Mathematik der Universität Kaiserslautern, Mai 1988
- [14] Chlormann, U. H., Seeger, T.: Rainflow-HCM - Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage. Stahlbau, 55(3), S. 65 - 71, 1986
- [15] Masing, G.: Eigenspannung und Verfestigung beim Messing. In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Congress of Applied Mechanics, S. 332-335, 1926
- [16] Smith, K. N., Watson, P., Topper, T. H.: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. Journal of Materials, 5 (4), S. 767 - 768, 1970
- [17] Boller, Chr., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Part A: Unalloyed Steels, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-42870-4
- [18] Schön, M., Seeger, T.: Lebensdauerberechnung auf der Basis der Rainflow-Matrix, Technische Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Werkstoffmechanik, Vortrag im Haus der Technik 1993
- [19] Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-58348-3
- [20] Haibach, E.: Betriebsfeste Bauteile, Konstruktionsbücher Band 38, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-54815-7
- [21] Boller, Chr., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Part B: Low Alloy Steels, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-42871-2
- [22] Boller, Chr., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Part C: High Alloy Steels, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-42871-0
- [23] Boller, Chr., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Part D: Aluminium and Titanium Alloys, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-42873-9
- [24] Boller, Chr., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Part E: Cast and Welded Metals, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-42874-7
- [25] Boller, Chr., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Part E: Unalloyed Steels, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-42874-7
- [26] Issler, L., Ruoß, H., Häfele, P.: Festigkeitslehre Grundlagen, Springer-Verlag Berlin 1995, ISBN 3-540-57995-8
- [27] Haibach, E., Berger, C., Hänel, B., Wirthgen, G., Zenner, H., Seeger, T.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, Heft Nr. 183-1, 1994, Forschungskuratorium Maschinenbau, Lyonerstr. 18, Frankfurt/M.

- [28] Dorn, S.: Rechnerische Lebensdauerermittlung nach verschiedenen Rechenkonzepten im Vergleich mit Meßdaten und Bestimmung von Formzahlen mit Hilfe von FE-Rechnungen, Diplomarbeit an der FH-Coburg im Studienschwerpunkt Maschinenbau, April 1996
- [29] Zenner H. und Liu J.: Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept, Konstruktion 44 (1992) Seite 9-17
- [30] A. Bäumel Jr, T. Seeger: Materials Data for Cyclic Loading, supplement 1, Elsevier Science Publishers B.V.1987, ISBN 0-444-88603 6
- [31] Manson S.S.: Fatigue: A Complex Subject - Some Simple Approximations. Experimental Mechanics, 5:193-226, 1965
- [32] Muralidharan, U; Manson, S.S.: A Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue Characteristics of Metals. Journal of Engineering Materials and Technology, 110:55-58, 1988
- [33] Gudehus, Zenner: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen. 3. Auflage, ISBN 3-514-00445-5, Verlag Stahleisen, Düsseldorf.
- [34] Störzel, K.; Sonsino C.M.: Verfahren zur Lebensdauerabschätzung auf der Basis von Rainflow-Matrizen örtlicher Dehnungen; Fraunhofer - Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt, LBF-Nr. 7662 (1994), unveröffentlichter Eigenforschungsbericht.
- [35] FKM Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 4. erweiterte Ausgabe 2002, Forschungskuratorium Maschinenbau, 1998
- [36] Häckh, J; Willmerding, G; Kley, M; Binz, H; Körner, T.: rechnerische Lebensdauerabschätzung von Getriebegehäusen unter Einbeziehung realer multiaxialer Belastungen, DVM-Tagung Fulda vom 5. bis 6.6. 2002, VDI-Berichte N2. 1689, 2002 Seite 303 - 317
- [37] Körner, T; Depping, H; Häckh, J; Willmerding, G; Klos, W.: Rechnerische Lebensdauerabschätzung unter Berücksichtigung realer Belastungskollektive für die Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes, DVM-Tagung Fulda vom 5. bis 6.6. 2002, VDI-Berichte N2. 1689, 2002 Seite 275 - 285
- [38] Körner, T; Depping, H; Häckh, J; Willmerding, G.: Fatigue Life Prognosis for Transmissions based on critical Component Spectrum, World Automotive Congress FISITA 2002, Helsinki, Paper Nr. F02V091
- [39] Eichsleder W. Unger B.: Lebensdauerberechnung auf der Basis von Finite Element Ergebnissen; 19. Vortragsveranstaltung des DVM Arbeitskreises Betriebsfestigkeit München 1993
- [40] Köttgen V.B.; Anthes R.J.; Seeger T.: Implementation des Werkstoffmodells von Mroz in das Finite Element Programm Abaqus Teil 1; Bericht aus dem Fachgebiet Werkstoffmechanik der Universität Darmstadt

- [41] Köttgen V.B.; Anthes R.J; Seeger T.: Implementation des Werkstoffmodells von Mroz in das Finite Element Programm Abaqus Teil 2: Quelltext und Beispiele; Bericht aus dem Fachgebiet Werkstoffmechanik der Universität Darmstadt
- [42] Chu Chin-Chan; Conle F; Albrecht Bonnen; John J. F.: Multiaxial Stress-Strain Modeling and Fatigue Life Prediction of SAE Axle Shafts; American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1993
- [43] Mayer, Kötze: Lebensdauerabschätzung von Fahrwerksteilen unter Berücksichtigung der sich drehenden Hauptspannungen; VDI-Berichte 1283, 1996 Seite 349
- [44] Steinwender, Greald; Gaier, Christian; Unger, Bernhard: Simulation der Betriebsfestigkeit von mehrachsig belasteten Fahrwerksbauteilen; 7. Aachener Kolloquium vom 5.-7. Oktober 1998, Aachen, Seite 1141
- [45] Issler, Festigkeitslehre
- [46] Yousefi F.; Küppers, M.: Lebensdauerberechnung mehraxial, Vorhaben Nr. 235, Forschungskuratorium Maschinenbau
- [47] Radaj, D.; Sonsino, C.M.;Fricke, W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches, 2. Auflage, Woodhead publishing limited, ISBN-13: 978-1-85573-948-2
- [48] Fricke, W.: Recommended hot spot analysis procedure for structural details of ships and FPSOs based on round-robin FE analyses, Int J Offshore Polar Engng, 20020 12 (1), 40-47
- [49] Bäckström, M.; Marquis, G.: A review of multiaxial fatigue of weldments: experimental results, design code and critical plane approaches, Fatigue Fracture Engng Mater Struct 24, 279-291
- [50] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, International Institute of welding, IIW document IIW-1823-07 december 2008
- [51] Germanischer Lloyd: Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Edition 2005
- [52] Gaier, C; Dannbauer, H.: An efficient critical plane method for ductile, semiductile and brittle materials, Fatigue 2006: 9<sup>th</sup> International Fatigue Congress Atlanta, 14.5-19.5.2006, Vortrag Nr. FT 436
- [53] N.N.:Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie; Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten; Teil 2; ISSN 0943-9412, VDA, Frankfurt am Main, 2000
- [54] Richard, H. A.; Sander, M.: Ermüdungsrisse, ISBN 978-3-8348-0292-7

[55] Rennert, R; Kullig, E; Vormwald, M; Esderts, A; Siegele, D: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile; 6. Auflage 2012; ISBN 978-3-8163-0605-4

[56] Berger, C; Blauel, G; Hodulak, L; Pyttel, B; Varfolomeyev, I; Gerdes, C.P.: Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile; 3. Ausgabe, Stand 2009, ISBN 978-3-8163-0514-9

[57] Weber, H.: Modellierung von multi-korrelierten stochastischen Lastprozessen und ihre Anwendung beim lebensdauerorientierten Entwurf von ermüdungsbeanspruchten Tragwerken, Dissertation Ruhr Universität Bochum, 2004

---

## 9.2. Zahnräder und Lager

[1] DIN 3990 Teil 1: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Einführung und allgemeine Einflußfaktoren

[2] DIN 3990 Teil 2: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Berechnung der Grübchentragfähigkeit

[3] DIN 3990 Teil 2: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Dauerfestigkeit und Werkstoffqualitäten

[4] Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V.: Zahnfuß-Betriebsfestigkeit, Forschungsvorhaben Nr. 188/I und II, 1993 Heft 408 und 1996 Heft 502

[5] Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V.: Zahnflankenlebensdauer, Forschungsvorhaben Nr. 125/III, 1995 Heft 457

[5] Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V.: Zahnflankenlebensdauer, Forschungsvorhaben Nr. 125/III, 1995 Heft 457

[6] Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V.: Zahnrad-Lebensdauerprüfung mit Lastkollektiven, Forschungsvorhaben Nr. 125/I Heft 290 1989

[7] Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V.: Zahnrad-Lebensdauerprüfung: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnradflanken, Heft 320 1991

[7] Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V.: Zahnrad-Lebensdauerprüfung: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnradflanken, Heft 320 1991

[8] G. Niemann; H. Winter: Maschinenelemente Band II; Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe-Grundlagen, Stirnradgetriebe, Zweite Auflage, Springer-Verlag, ISBN 3-540-11149-2

[9] Hexagon, Ein Programm zur Zahnradberechnung

[10] DIN 3990 Teil 3: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit

[11] DIN 3990 Teil 11: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Anwendungsnorm für Industriegetriebe, Detail-Methode

[12] DIN 3990 Teil 21: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Anwendungsnorm für Schnellaufgetriebe und Getriebe ähnlicher Anforderungen

---

## 9.3. Statistik

[1] Gramlich, Günter.:

Skript zur Stochastik, Eine Einführung in die Mathematik der Daten des Zufalls, [www.hs-ulm.de/gramlich](http://www.hs-ulm.de/gramlich)

[2] Kleppmann, Wilhelm:

Taschenbuch Versuchsplanung, Hanser-Verlag, 2009, ISBN 978-3-446-42033-5

[3] wikipedia:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Latin\\_square](http://en.wikipedia.org/wiki/Latin_square)

[4] M.D. McKay ; R. J. Beckmann ; W.J. Conover:

A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Zeitschrift Technometrics, Vol. 21, No. 2, May 1979

[5] Aleksandar Trifkovi:

Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for

Planning, Design and Operation of Water Supply Systems,

Dissertation Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, 2007

[6] Willmerding, G.:

Opti: ein Programm zur Multiplen, nichtlinearen Regressionsanalyse.

Handbuch zur Software. Steinbeis TZ-Verkehrstechnik 1986









# 10. Rechtliche Hinweise / Nutzungsbedingungen

---

## 10.1. §1 Vertragsgegenstand

1.1 Der Käufer erwirbt von

**Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer**

vertreten durch

Steinbeis Transferzentrum

Neue Technologien in der Verkehrstechnik

Rosenstr. 5, 89168 Niederstotzingen

- nachfolgend „**Verkäufer**“ genannt -

die Software winLIFE unter den in diesem Vertrag vereinbarten Nutzungsbedingungen.

1.2 Der Quellcode (Source Code) der Software ist nicht Teil der Vertragsgegenstände.

1.3 Für die Beschaffenheit der vom Verkäufer gelieferten Software ist die bei Versand der Vertragsgegenstände gültige und dem Käufer vor Vertragsschluss zur Verfügung stehende Leistungsbeschreibung, ergänzend auch die Anwendungsdokumentation, abschließend maßgeblich. Eine darüber hinausgehende Beschaffenheit der Software schuldet der Verkäufer nicht.

1.4 Allgemeine Geschäftsbedingungen des Käufers werden nicht Vertragsinhalt, insbesondere auch nicht, wenn diese Angebotsaufforderungen, Bestellungen, Annahmeerklärungen beigefügt sind und/ oder diesen nicht widersprochen wird.

---

## 10.2. § 2 Nutzungsumfang

2.1 Der Verkäufer räumt dem Käufer mit vollständiger Bezahlung der geschuldeten Vergütung ein einfaches, zeitlich unbeschränktes, nicht unterlizenzierbares Nutzungsrecht an der Software winLIFE ein.

2.2 Der Käufer darf die Software winLIFE nur zu dem Zweck einsetzen, seine internen Geschäftsvorfälle und die von solchen Unternehmen abzuwickeln, die mit ihm im Sinne des § 15 AktG verbunden sind („Konzernunternehmen“). Die gewerbliche Weitervermietung ist generell untersagt.

2.3 Vervielfältigungen der Software winLIFE sind nur insoweit zulässig, als dies für den vertragsmäßigen Gebrauch notwendig ist. Der Käufer darf von der Software winLIFE Sicherungskopien nach den Regeln der Technik im notwendigen Umfang anfertigen. Sicherungskopien auf beweglichen Datenträgern sind als solche zu kennzeichnen und mit dem Urheberrechtsvermerk des Originaldatenträgers zu versehen.

2.4 Der Käufer ist zu Änderungen, Erweiterungen und sonstigen Umarbeitungen der Software winLIFE im Sinne des § 69c Nr. 2 UrhG nur insoweit befugt, als das Gesetz solches unabdingbar erlaubt. Dem Käufer stehen an den Bearbeitungen eigene Nutzungs- und Verwertungsrechte –über die nach diesem Vertrag eingeräumten Nutzungsrechte hinaus– nicht zu.

2.5 Überlässt der Verkäufer dem Käufer im Rahmen von Nachbesserung oder Pflege Ergänzungen (z.B. Patches, Ergänzungen der Anwenderdokumentation) oder eine Neuauflage der Software winLIFE (z.B. Update, Upgrade, neue Anwenderdokumentation), die früher überlassene Vertragsgegenstände ersetzen, unterliegen diese Ergänzungen oder Neuauflagen auch den Bestimmungen dieser Vereinbarung.

2.6 Stellt der Verkäufer eine Neuauflage der Software winLIFE zur Verfügung, so erlöschen in Bezug auf die alte Software winLIFE die Befugnisse des Käufers nach diesem Vertrag auch ohne ausdrückliches Rückgabeverlangen des Verkäufers, sobald der Käufer die neue Software winLIFE produktiv nutzt. Der Verkäufer räumt dem Käufer jedoch eine dreimonatige Übergangsphase ein, in der beide Versionen der Vertragsgegenstände nebeneinander genutzt werden dürfen.

---

## 10.3. § 3 Kaufpreis, Zahlungsbedingungen

3.1 Der Käufer erwirbt die Nutzungsrechte, die sich aus dem Angebot ergeben zu dem in dem Angebot genannten Kaufpreis. Der Kaufpreis richtet sich nach dem diesem Softwarekaufvertrag zu Grunde liegenden Angebot. Der Käufer ist zu einer Nutzung der Software, die über die in diesem Vertrag eingeräumten Nutzungsrechte hinausgeht, nur nach vorheriger schriftlicher Zustimmung des Verkäufers berechtigt. Bei Mehrnutzung ohne Zustimmung (insbesondere beim gleichzeitigen Einsatz einer größeren Zahl von Nutzern als vereinbart) ist der Verkäufer berechtigt, den für die weitergehende Nutzung anfallenden Betrag gemäß der zu diesem Zeitpunkt gültigen Preisliste des Verkäufers in Rechnung zu stellen, soweit der Käufer nicht einen wesentlich niedrigeren Schaden des Verkäufers nachweist. Weitergehende außervertragliche Schadenersatzansprüche bleiben unberührt.

3.2 Der Kaufpreis ist fällig und zahlbar ohne Abzug mit Lieferung bzw. Bereitstellung der Software.

3.3 Alle Preise verstehen sich zuzüglich der jeweils geltenden gesetzlichen Umsatzsteuer.

3.4 Die Preise für Lieferungen schließen Transport und Verpackung bei körperlichem Versand ein. Bei Bereitstellung zum Abruf über ein Netz trägt der Verkäufer die Kosten dafür, die Software abrufbar ins Netz zu stellen, der Käufer die Kosten für den Abruf.

3.5 Das Eigentum an überlassenen Vervielfältigungsstücken bleibt vorbehalten bis zur vollständigen Bezahlung der geschuldeten Vergütung.

---

## 10.4. § 4 Installation, Schulung, Pflege

4.1 Für die Installation der Software winLIFE verweist der Verkäufer auf die in der Anwendungsdokumentation beschriebenen Installationshinweise, insbesondere auf die Hard- und Softwareumgebung, die beim Käufer vorhanden sein muss. Durch Installation des Programms auf einem Rechner erklärt sich der Käufer mit den hier genannten Bedingungen einverstanden. Ist der Käufer nicht einverstanden, so werden die CDs und die übergebenen Unterlagen vom Käufer unverzüglich zurückgegeben. Der gezahlte Kaufpreis wird von der Stelle zurückerstattet, bei dem das Programm gekauft wurde.

4.2 Auf Wunsch des Käufers übernimmt der Verkäufer die **Schulung und Pflege** der Software winLIFE auf der Basis gesondert abzuschließender Vereinbarungen und der jeweils anwendbaren Preisliste. Der Verkäufer ist bereit, auf Grundlage eines gesondert abzuschließenden Pflegevertrages, die Software zu pflegen.

---

## **10.5. § 5 Schutz von Software und Anwendungsdokumentation**

5.1 Soweit nicht dem Käufer nach diesem Vertrag ausdrücklich Rechte eingeräumt sind, stehen alle Rechte an der Software winLIFE (und aller vom Käufer angefertigter Kopien) –insbesondere das Urheberrecht, die Rechte auf oder an Erfindungen sowie technische Schutzrechte – ausschließlich dem Verkäufer zu.

---

## **10.6. § 6 Weitergabe**

6.1 Der Käufer darf die Software winLIFE einem Dritten nur einheitlich und unter vollständiger und endgültiger Aufgabe der eigenen Nutzung der Vertragsgegenstände überlassen.

6.2 Die vorübergehende Überlassung der Nutzung an Dritte ist untersagt, gleich ob die Software winLIFE in körperlicher oder unkörperlicher Form überlassen werden.

6.3 Gibt der Käufer Datenträger, Speicher oder sonstige Hardware, auf denen Vertragsgegenstände (ganz oder teilweise, unverändert oder umgearbeitet) gespeichert sind,

6.3.1 an Dritte ab, ohne dass eine Weitergabe nach Ziffer 6 vorliegt oder

6.3.2 gibt er den unmittelbaren Besitz hieran auf.

trägt er dafür Sorge, dass vorher die gespeicherte Software winLIFE vollständig gelöscht werden.

---

## **10.7. § 7 Mitwirkungs- und Informationspflichten des Käufers**

7.1 Der Käufer hat sich über die wesentlichen Funktionsmerkmale der Software winLIFE informiert und trägt das Risiko, ob diese seinen Wünschen und Bedürfnissen entspricht; über Zweifelsfragen hat er sich vor der Nutzung durch Mitarbeiter des Verkäufers bzw. durch fachkundige Dritte beraten lassen.

7.2 Die Einrichtung einer funktionsfähigen – und auch unter Berücksichtigung der zusätzlichen Belastung durch die Software winLIFE ausreichend dimensionierten – Hard- und Softwareumgebung liegt in der alleinigen Verantwortung des Käufers.

7.3 Der Käufer testet die Software winLIFE vor deren Einsatz gründlich auf Verwendbarkeit in der bestehenden Hard- und Softwarekonfiguration. Dies gilt auch für Software, die er im Rahmen der Gewährleistung erhält.

7.4 Der Käufer trifft angemessene Vorkehrungen für den Fall, dass die Software winLIFE ganz oder teilweise nicht ordnungsgemäß arbeitet (z.B. durch tägliche Datensicherung, Störungsdiagnose, regelmäßige Überprüfung der Datenverarbeitungsergebnisse).

---

## **10.8. § 8 Liefer- und Leistungszeit, Höhere Gewalt**

8.1 Die Software wird mangels anderer Absprache in der bei Auslieferung aktuellen Fassung geliefert.

- 8.2 Der Verkäufer bewirkt die Lieferung, indem er nach seiner Wahl entweder
- 8.2.1 dem Käufer eine (1) Programmkopie der Software auf maschinenlesbarem Datenträger, sowie für jeden Nutzer nach Ziffer 2.1 ein Exemplar der Anwendungsdokumentation überlässt oder
- 8.2.2 die Software in einem Netz abrufbar bereitstellt und dies dem Auftraggeber mitteilt, sowie ihm für jeden Nutzer nach Ziffer 2.1 ein Exemplar der Anwendungsdokumentation überlässt.
- 8.3 Für die Einhaltung von Lieferterminen und den Gefahrübergang ist bei körperlichem Versand der Zeitpunkt maßgeblich, in dem der Verkäufer Software und Anwendungsdokumentation dem Transporteur übergibt, ansonsten der Zeitpunkt, in dem die Software im Netz abrufbar bereitgestellt ist und dies dem Auftraggeber mitgeteilt wird.
- 8.4 Solange der Verkäufer
- 8.4.1 auf die Mitwirkung oder Informationen des Käufers wartet oder
- 8.4.2 durch Streiks oder Aussperrung in Drittbetrieben oder im Betrieb des Verkäufers (im letzteren Fall jedoch nur, wenn der Arbeitskampf rechtmäßig ist), behördliches Eingreifen, gesetzliche Verbote oder andere unverschuldete Umstände in seinen Leistungen behindert ist ("höhere Gewalt"),
- gelten Liefer- und Leistungsfristen um die Dauer der Behinderung und um eine angemessenen Anlaufzeit nach Ende der Behinderung ("Ausfallzeit") als verlängert und liegt für die Dauer der Ausfallzeit keine Pflichtverletzung vor. Der Verkäufer teilt dem Käufer derartige Behinderungen und ihre voraussichtliche Dauer unverzüglich mit. Dauert die höhere Gewalt ununterbrochen länger als 3 Monate an, werden beide Parteien von ihren Leistungspflichten frei.

---

## 10.9. § 9 Sach- und Rechtsmängel, sonstige Leistungsstörungen, Verjährung

- 9.1 Der Verkäufer leistet nach den Regeln des Kaufrechts Gewähr für die vereinbarte Beschaffenheit der Vertragsgegenstände gemäß Ziffer 1.1 und dafür, dass der Nutzung der Vertragsgegenstände im vertraglichen Umfang durch den Käufer keine Rechte Dritter entgegenstehen. Die Gewähr für die Freiheit der Vertragsgegenstände von Rechten Dritter gilt jedoch nur für das zwischen den Parteien vereinbarte Bestimmungsland, in dem die Vertragsgegenstände verwendet werden sollen. Ohne ausdrückliche Vereinbarung gilt die Gewähr für die Bundesrepublik Deutschland.
- 9.2 Der Verkäufer leistet bei Sachmängeln zunächst Gewähr durch Nacherfüllung. Hierzu überlässt er nach seiner Wahl dem Käufer einen neuen, mangelfreien Softwarestand oder beseitigt den Mangel; als Mangelbeseitigung gilt auch, wenn der Verkäufer dem Käufer zumutbare Möglichkeiten aufzeigt, die Auswirkungen des Mangels zu beseitigen. Bei Rechtsmängeln leistet der Verkäufer zunächst Gewähr durch Nacherfüllung. Hierzu verschafft er nach seiner Wahl dem Käufer eine rechtlich einwandfreie Benutzungsmöglichkeit an den gelieferten Vertragsgegenständen oder an ausgetauschten oder geänderten gleichwertigen Vertragsgegenständen.
- 9.3 Der Käufer ist verpflichtet, einen neuen Softwarestand zu übernehmen, wenn der vertragsgemäße Funktionsumfang erhalten bleibt und die Übernahme nicht zu erheblichen Nachteilen führt.
- 9.4 Schlagen zwei Versuche der Nacherfüllung fehl, ist der Käufer berechtigt, angemessene Nachfrist zur Mängelbeseitigung zu setzen. Er hat dabei ausdrücklich und schriftlich darauf hinzuweisen, dass er sich das Recht vorbehält, bei erneutem Fehlschlagen vom Vertrag zurück zu treten und/ oder Schadensersatz zu verlangen.
- Schlägt die Nachbesserung auch in der Nachfrist fehl, kann der Auftraggeber vom Vertrag zurücktreten oder die Vergütung mindern, außer es liegt ein unerheblicher Mangel vor. Schadensersatz oder Ersatz vergeblicher Aufwendungen wegen eines Mangels leistet der Verkäufer im Rahmen der in Ziffer 10 festgelegten Grenzen.
- 9.5 Behaupten Dritte Ansprüche, die den Käufer hindern, die ihm vertraglich eingeräumten Nutzungsbefugnisse wahrzunehmen, unterrichtet der Käufer den Verkäufer unverzüglich schriftlich und umfassend. Er ermächtigt den Verkäufer hiermit, die Auseinandersetzung mit dem Dritten gerichtlich und außergerichtlich allein zu führen.

Der Verkäufer ist verpflichtet, die Ansprüche auf eigene Kosten abzuwehren und den Käufer von allen mit der

Anspruchsabwehr verbundenen Kosten und Schäden freizustellen, soweit diese nicht auf dessen pflichtwidrigem Verhalten beruhen.

9.6 Die Verjährungsfrist für alle Gewährleistungsansprüche beträgt ein Jahr und beginnt mit der Lieferung bzw. Bereitstellung der Vertragsgegenstände; die gleiche Frist gilt für sonstige Ansprüche, gleich welcher Art, gegenüber dem Verkäufer.

9.7 Bei Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit des Verkäufers, bei arglistigem Verschweigen des Mangels, bei Personenschäden oder Rechtsmängeln im Sinne des § 438 Abs. 1 a BGB, sowie bei Garantien (§ 444 BGB) gelten die gesetzlichen Verjährungsfristen. Ebenso bei Ansprüchen nach dem Produkthaftungsgesetz.

---

## 10.10. § 10 Haftung

10.1 In allen Fällen vertraglicher und außervertraglicher Haftung leistet der Verkäufer Schadensersatz ausschließlich nach Maßgabe folgender Grenzen:

10.1.1 bei Vorsatz in voller Höhe, ebenso bei Fehlen einer Beschaffenheit, für die der Verkäufer eine Garantie übernommen hat;

10.1.2 bei grober Fahrlässigkeit nur in Höhe des vorhersehbaren Schadens, der durch die verletzte Pflicht verhindert werden sollte;

10.1.3 in anderen Fällen: nur in Höhe des typischerweise vorhersehbaren Schadens. Ist der typischerweise vorhersehbare Schaden pro Schadensfall höher als der Kaufpreis der Software winLIFE, verpflichtet sich der Käufer den Verkäufer innerhalb von 2 Wochen nach Vertragsabschluss darauf hinzuweisen. In diesem Fall ist der Verkäufer zum Rücktritt berechtigt, wenn nicht eine andere einvernehmliche Haftungsgrenze vereinbart wird.

10.2 Die Haftungsbegrenzungen gemäß Ziffer 10.1 gelten nicht bei der Haftung für Personenschäden und bei der Haftung nach dem Produkthaftungsgesetz.

10.3 Dem Verkäufer bleibt der Einwand des Mitverschuldens (z.B. aus Ziffer 7) unbenommen.

10.4 Für die Verjährungsfrist gilt Ziffer 9.6 entsprechend, mit der Maßgabe, dass für Ansprüche nach Ziffer 10.1.1 und Ziffer 10.2 die gesetzliche Verjährungsfrist gilt. Die Verjährungsfrist gemäß Satz 1 beginnt mit dem in § 199 Abs. 1 BGB bestimmten Zeitpunkt. Sie tritt spätestens mit Ablauf der in § 199 Abs. 3 und 4 BGB bestimmten Höchstfristen ein.

10.5 Soweit die Haftung nach diesen Bedingungen ausgeschlossen oder begrenzt wird, gilt dies auch für die persönliche Haftung der Organe, der Angestellten, Arbeitnehmer, Mitarbeiter, Vertreter und Unterauftragnehmer des Verkäufers.

---

## 10.11. § 11 Geheimhaltung, Datenschutz

11.1 Die Vertragspartner verpflichten sich, alle im Rahmen der Vertragsanbahnung und -durchführung erlangten Kenntnisse von vertraulichen Informationen und Betriebsgeheimnissen ("Betriebsgeheimnisse") des jeweils anderen Vertragspartners zeitlich unbegrenzt vertraulich zu behandeln und nur für Zwecke der Durchführung dieses Vertrages zu verwenden. Zu den Betriebsgeheimnissen des Verkäufers gehören auch die Vertragsgegenstände und die nach diesem Vertrag erbrachten Leistungen.

11.2 Der Käufer wird Vertragsgegenstände Mitarbeitern und sonstigen Dritten nur zugänglich machen, soweit dies zur Ausübung der ihm eingeräumten Nutzungsbefugnisse erforderlich ist.

11.3 Die vorstehenden Verpflichtungen gelten nicht für Betriebsgeheimnisse, die

11.3.1 zur Zeit ihrer Übermittlung durch den Vertragspartner bereits offenkundig oder der anderen Vertragspartei bekannt waren;

11.3.2 nach ihrer Übermittlung durch den Vertragspartner ohne Verschulden der anderen Vertragspartei offenkundig geworden sind;

11.3.3 nach ihrer Übermittlung durch den Vertragspartner der anderen Vertragspartei von dritter Seite auf nicht rechtswidrige Weise und ohne Einschränkung in Bezug auf Geheimhaltung oder Verwertung zugänglich gemacht worden sind;

11.3.4 die von einer Vertragspartei eigenständig, ohne Nutzung der Betriebsgeheimnisse des Vertragspartners, entwickelt worden sind;

11.3.5 die gemäß Gesetz, behördlicher Verfügung oder gerichtlicher Entscheidung veröffentlicht werden müssen – vorausgesetzt, die veröffentlichende Partei informiert den Vertragspartner hierüber unverzüglich und unterstützt ihn in der Abwehr derartiger Verfügungen bzw. Entscheidungen; oder

11.3.6 soweit dem Vertragspartner die Nutzung oder Weitergabe der Betriebsgeheimnisse auf Grund zwingender gesetzlicher Bestimmungen oder auf Grund dieses Vertrages gestattet ist.

11.4 Der Verkäufer hält die Regeln des Datenschutzes ein, insbesondere wenn ihm Zugang zum Betrieb oder zu Hard- und Software des Käufers gewährt wird.

---

## 10.12. § 12 Schlussvorschriften

12.1 Ausschließlicher Gerichtsstand für alle Streitigkeiten aus und im Zusammenhang mit diesem Vertrag ist der Geschäftssitz des Verkäufers. Klagt der Verkäufer, ist er auch berechtigt, den Gerichtsstand am Sitz des Käufers zu wählen. Das Recht beider Parteien, um einstweiligen Rechtsschutz vor den nach den gesetzlichen Bestimmungen zuständigen Gerichten nachzusuchen, bleibt unberührt.

12.2 Es gilt ausschließlich deutsches Recht unter Ausschluss des UN-Kaufrechts (CISG).

12.3 Der Vertragsschluss sowie spätere Vertragsänderungen und –ergänzungen bedürfen zu ihrer Wirksamkeit der Schriftform. Das gilt ebenso für die Abänderung dieser Klausel. Mündliche Nebenabreden sind nicht getroffen. Alle Erklärungen der Parteien bedürfen zur Wirksamkeit der Schriftform.

12.4 Sollte eine Bestimmung dieses Vertrages unwirksam sein oder werden, eine unzulässige Fristbestimmung oder eine Lücke enthalten, so bleibt die Rechtswirksamkeit der übrigen Bestimmungen hiervon unberührt. Soweit die Unwirksamkeit sich nicht aus einem Verstoß gegen §§ 305ff. BGB (Geltung Allgemeiner Geschäftsbedingungen) ergibt, gilt anstelle der unwirksamen Bestimmung eine wirksame Bestimmung als vereinbart, die dem von den Parteien Gewollten wirtschaftlich am nächsten kommt. Das Gleiche gilt für den Fall einer Lücke. Im Falle einer unzulässigen Frist gilt das gesetzlich zulässige Maß. Bei einem Verstoß gegen §§ 305ff. BGB werden die Parteien einvernehmlich eine Lösung im Sinne von Satz 2 finden.







# 11. Glossary of Terms

## **Term1**

Type definition here.

## **Term2**

Type definition here.



# 12. Index

## A

Aluminiumgusswerkstoff: 26  
Aluminiumknetwerkstoff 26  
Aluminiumwerkstoff 26

## B

Bauteil-Istwerte 25  
Bauteil-Normwert aus Bauteil-Zeichungswerten 25  
Bauteilnormwerte aus Halbzeugnormwerten 24  
Bauteil-Wöhlerlinie Typ I 79  
Bauteil-Wöhlerlinie Typ II 79  
Bestimmung des effektiven Durchmessers  $d_{eff}$  26

## D

Duktile Werkstoffe 16

## E

entfestigende Aluminiumwerkstoffe 42, 47, 48

## F

Fall 1 26  
Fall 2 26  
Für alle anderen Stahl- und Eisenguß Werkstoffe 25

## G

Geschweißte Bauteile 73, 74  
GJL 25  
GW und WEZ 21

## H

Höhere Temperaturen: Bei Stahl und Eisengusswerkstoffe bis 500 °C 55

## M

Mehrachsigkeit 18

## N

Nachweis mit Kerbspannungen 43  
Nicht geschweißte Bauteile 73

Nichtgeschweißte Bauteile 74  
Nichtrostender Stahl: 25  
Niedere Temperaturen liegen außerhalb des Anwendungsbereichs 30  
Niedrige Temperatur: 55  
Normale Temperaturen: KT,D = 1 55  
Normale Temperaturen: KT,m = 1 30

## **S**

Schweißnaht SN 22  
semiduktil oder spröde 17  
Stahl – und Eisenguß Werkstoff 25  
Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe 47, 48  
Stahl und nicht entfestigende Aluminiumwerkstoffe: 42

## **T**

Temperaturfaktor, Kurzzeitwerte 31  
Temperaturfaktor, Langzeitwerte 32, 33

## **V**

Vorrang der Einzelmittelspannung 75