

Ermüdungsfestigkeitsnachweis
mit örtlichen Spannungen
nach der FKM Richtlinie
„Rechnerischer Festigkeitsnachweis für
Maschinenbauteile“

1	Einleitung.....	3
1.1	Funktionalität der Software	3
1.2	Anwendungsbereich	3
1.3	Literatur	4
2	Hintergründe	5
2.1	Die FKM Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile [10], [2], [4]	5
2.2	Zusammenfassung [7].....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.3	Aussagekraft der Lebensdauerberechnung, [5], [10], [7], [3]	5
3	Umsetzung in KISSsoft	9
3.1	Hauptmaske	9
3.1.1	Auswahl der Bauteilform.....	9
3.1.2	Eingabe der Spannungswerte am Nachweispunkt und am Stützpunkt.....	10
3.2	Modulspezifische Einstellungen	11
3.2.1	Allgemeine Einstellungen.....	11
3.2.2	Sollsicherheiten.....	12
3.3	Generelle Daten	14
3.3.1	Allgemeine Eingaben.....	14
3.3.2	Wöhlerlinie	16
3.3.3	Überlastungsfälle	16
3.4	Spannungsverhältnisse.....	17
3.5	Rauhigkeit.....	19
3.6	Kollektive	20
3.7	Materialdatenbank	20
4	Menüs	21
4.1	Datei.....	21
4.2	Projekt.....	21
4.3	Protokoll	21
4.4	Einstellungen	21
4.5	Hilfe	21
5	Geplante Erweiterungen	22
5.1	Nachweise mit Nennspannungen.....	22
5.2	Kollektive	22
5.3	Anbindung an FEM Pakete.....	22

1 Einleitung

1.1 Funktionalität der Software

Das Berechnungsprogramm liefert einen kompletten, schriftlichen Nachweis der statischen und der Ermüdungsfestigkeit für einen Nachweispunkt W.

Der Nachweis erfolgt nach dem örtlichen Konzept wie in der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ beschrieben. Die Idee des örtlichen Konzeptes besteht darin, die Lebensdauer ausgehend von der elastisch-plastischen örtlichen Beanspruchung am kritischen Ort des Bauteils im Vergleich mit der am ungekerbten Probestab unter einachsiger Beanspruchung ermittelten Dehnungswöhlerlinie zu bestimmen. Im Rahmen der FKM-Richtlinie ist das örtliche Konzept als Variante auf Spannungsbasis umgesetzt. Bedingung der Anwendung sind also elastisch berechnete Spannungen. Somit liegt kein wirkliches örtliches Konzept wie das elastisch-plastische Kerbgrundkonzept („örtliches“ Konzept) vor, sondern ein dem Nennspannungskonzept nahestehendes Konzept, bei dem nur die „Formzahl auf der anderen Seite“ steht. Sie ist damit ein nützliches Werkzeug für den statischen und Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den hochzyklischen Bereich ($N > 1 \cdot 10^4$).

Eingabe: Es werden die Spannungen an einem Auswertepunkt und einem Stützpunkt vorgegeben. Oder es werden die Spannungen am Auswertepunkt vorgegeben und die Stützwirkung wird rechnerisch abgeschätzt. Weiter werden die zur Berechnung der Konstruktionsbeiwerte notwendige Parameter wie Oberflächenrauigkeit etc. benötigt. Weitere Belastungsdaten wie Zyklenzahl, Kollektiv, Temperatur etc. werden ebenfalls vorgegeben.

Ausgabe: Berechnet werden die Ausnutzungsgrade und als Kehrwert davon die rechnerischen Sicherheiten für die statischen Fälle und den Ermüdungsfall.

1.2 Anwendungsbereich

Die Software basiert auf der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, Kapitel 3 und 4. Die Richtlinie gilt für den Maschinenbau und für verwandte Bereiche der Industrie. Ihre Anwendung ist zwischen den Vertragspartnern zu vereinbaren.

Für mechanisch beanspruchte Bauteile ermöglicht sie einen rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit, letzteren je nach Beanspruchungscharakteristik als Dauer- oder als Betriebsfestigkeitsnachweis.

Andere rechnerische Nachweise wie beispielsweise der Sprödbrochursicherheit, der Stabilität, der Standsicherheit oder der Verformung unter Last, oder auch experimentelle Festigkeitsnachweise sind nicht Gegenstand der Richtlinie.

Es wird vorausgesetzt, dass die Bauteile hinsichtlich Konstruktion, Werkstoff und Verarbeitung fachgerecht und im technischen Sinne fehlerfrei ausgeführt sind.

Die Richtlinie gilt für Bauteile aus Eisen- und Aluminiumwerkstoff – auch bei höherer Temperatur, die mit oder ohne spanabhebende Bearbeitung oder auch durch Schweißen hergestellt werden, und im einzelnen

- für Bauteile mit geometrischen Kerben
- für Bauteile mit Schweissverbindungen
- für statische Beanspruchung
- für Ermüdungsbeanspruchung ab etwa 10^4 Zyklen als Einstufen- oder Kollektivbeanspruchung
- für Walz- und Schmiedestahl, auch nichtrostenden, Eisengusswerkstoffe sowie Aluminiumknet- und -Gusswerkstoff

- für Bauteiltemperaturen
 - von -40°C bis 500°C bei Stahl,
 - von -25°C bis 500°C bei Eisengusswerkstoffen
 - von -25°C bis 200°C bei Aluminiumwerkstoff
- für nichtkorrosives Umgebungsmedium.

Die Anwendung der Richtlinie ausserhalb des genannten Anwendungsbereiches sind ergänzende Vereinbarungen zu treffen.

Die Richtlinie gilt nicht, wenn ein Festigkeitsnachweis nach anderen Normen, Vorschriften oder Richtlinien gefordert ist, oder wenn speziellere Berechnungsunterlagen, wie beispielsweise für Schraubenverbindungen, vorliegen.

Die Berechnung mit Nennspannungen ist für einfache stabförmige und für flächenförmige Bauteile zu bevorzugen. Die Berechnung mit örtlichen Spannungen ist bei volumenförmigen Bauteilen anzuwenden und darüber hinaus ganz allgemein, wenn die Spannungsbestimmung nach der Finite-Elemente-Methode oder nach der Randelement Methode durchgeführt wird, wenn keine definierten Querschnitte oder keine einfachen Querschnittsformen vorliegen, wenn keine Formzahlen oder Kerbwirkungszahlen bekannt sind oder (bezügliche des statischen Festigkeitsnachweises) bei spröden Werkstoffen.

1.3 Literatur

- [1] FKM Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 4., erweiterte Ausgabe 2002, VDMA Verlag
- [2] E. Haibach, Stand der FKM-Richtlinie und zuarbeitender Forschungsarbeiten, VDI Berichte 1689, VDI Verlag
- [3] H. Mertens, A. Linke, Sicherheit und Genauigkeit beim Festigkeitsnachweis, VDI Berichte 1689, VDI Verlag
- [4] B. Hänel, FKM Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile – Erfahrungen und Weiterentwicklung, VDI Berichte 1689, VDI Verlag
- [5] H. Zenner, C. M. Sonsino, T. Jung, F. Yousefi, M. Küppers, Lebensdauer-Software, VDI Berichte 1689, VDI Verlag
- [6] E. Haibach, Betriebsfeste Bauteile, Konstruktionsbücher Band 38, Springer Verlag 1992
- [7] H. Gudehus, H. Zenner, Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, 4. Auflage, Stahleisenverlag 1999
- [8] D. Schlottmann, Auslegung von Konstruktionselementen, Springer Verlag 1995
- [9] Synthetische Wöhlerlinien für Eisenwerkstoffe, Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., 1999
- [10] E. Haibach, Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 2. Auflage, Springer Verlag 2002
- [11] W. Matek, D. Muhs, H. Wittel, M. Becker, D. Jannasch, Roloff/Matek Maschinenelemente, 15. Auflage, Vieweg 2001

2 Hintergründe

2.1 Die FKM Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile

Die Idee der heutigen FKM Richtlinie entstand anlässlich des DVM-Tages im Mai 1990 in Berlin bei einem Zusammentreffen von Fachleuten aus den beiden Deutschland. Es entstand der Plan, die in den TGL und VDI Richtlinien enthaltenen Erkenntnisse in die ohnehin anstehende Erarbeitung einer neuen Festigkeitsrichtlinie einzubeziehen. Grundlage bei ihrer Erarbeitung waren insbesondere ehemalige TGL-Standards, die frühere VDI-Richtlinie 2226 sowie Regelungen der DIN 18800, des Eurocode 3 und der IIW-Empfehlungen. Unter Einbeziehung neuerer Forschungsergebnisse wurde die FKM-Richtlinie auf einen aktuellen Erkenntnisstand weiterentwickelt. Die FKM-Richtlinie ist im Maschinenbau und in verwandten Bereichen der Industrie anwendbar. Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ erschien 1994 in ihrer ersten Ausgabe und 1998 in einer dritten, vollständig überarbeiteten (sie zeichnet sich aus durch wesentliche sachliche Erweiterungen und eine anwenderfreundliche Gliederung.) und erweiterten Ausgabe. 2002 erschien sie in einer vierten, nochmals erweiterten Ausgabe. Die wesentliche Neuerung hier ist die Ausweitung auf Aluminiumwerkstoffe. In Kürze wird es eine englische Ausgabe der Richtlinie geben. Mittlerweile hat die FKM-Richtlinie eine breite Anerkennung gefunden und kennzeichnet damit den Stand der Technik.

Für mechanisch beanspruchte Bauteile ermöglicht sie einen rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit und einen rechnerischen Nachweis der Dauer- und Betriebsfestigkeit, im Rahmen der Richtlinie als Ermüdungsfestigkeitsnachweis bezeichnet. Der statische Festigkeitsnachweis wird für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis vorausgesetzt. Der Nachweis kann ausgehend von Nennspannungen geschehen oder auch von örtlichen, elastisch bestimmten Spannungen, wie sie aus elastizitätstheoretischen Lösungen, Finite-Elemente- oder Randelement-Berechnungen oder aus Messungen erhalten werden. Werkstoffspezifische Parameter sind für Stähle, für Eisengusswerkstoffe, für Aluminiumknetlegierungen und Aluminiumgusswerkstoffe aufgeführt. Sie gelten unter nichtkorrosiven Umgebungsbedingungen. Werkstoffabhängig wird zwischen den Bereichen normaler und erhöhter Temperaturen unterschieden. Die Formeln des Nachweises sind aufbereitet für stabförmige, für flächenförmige und für volumenförmige Bauteile. Die Bauteile können mit oder ohne spanabhebende Bearbeitung oder auch durch Giessen oder Schweißen hergestellt sein. Es wird vorausgesetzt, dass die Bauteile hinsichtlich Konstruktion, Werkstoff und Verarbeitung fachgerecht und im technischen Sinne fehlerfrei ausgeführt sind.

Die Richtlinie ist in vier Kapitel gegliedert:

- Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen
- Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

In der beschriebenen Software sind die letzten beiden Punkte implementiert.

2.2 Aussagekraft der Lebensdauerberechnung

Es ist bekannt und ausgewiesen, dass die Genauigkeit der Lebensdauerberechnung ungenügend ist, d.h. zwischen Rechnung und Versuch können, bezogen auf die ertragbare Schwingungszahl, Faktoren im Bereich von 0.1 bis 10 und im Einzelfall auch grösser auftreten. Eine grundsätzliche, wenn auch etwas

vereinfachende Feststellung zu den Schwierigkeiten einer zuverlässigen Lebensdauerberechnung sei aber gemacht: Beim Festigkeitsnachweis handelt es sich um einen Vergleich zwischen den Kennwerten der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit. Beim statischen Festigkeitsnachweis kann das der Vergleich zwischen einer auftretenden Kraft und der ertragbaren Kraft sein. Beim Betriebsfestigkeitsnachweis handelt es sich um den Vergleich von Kennfunktionen, nämlich dem Beanspruchungskollektiv und der Wöhlerlinie. Versteht man die Schadenssumme, die für die Lebensdauerberechnung eine zentrale Bedeutung hat, als einen Quotienten der Kennfunktionen für Beanspruchung und Beanspruchbarkeit, so kann man erkennen, dass dieser Quotient sehr sensibel auf Änderungen dieser Kennfunktionen reagiert. Das bedeutet einmal, dass sich Fehler bei der Festlegung der Kennfunktionen stark auf das Ergebnis auswirken werden. Zum anderen kann durch eine gezielte Beeinflussung der Kennfunktionen, z.B. durch konstruktive sowie werkstoff- und fertigungstechnische Massnahmen, die ertragbare Lebensdauer nachhaltig erhöht werden.

Für die Lebensdauerberechnung zyklisch beanspruchter Bauteile stehen drei Konzepte zur Verfügung: das Nennspannungskonzept, das örtliche Konzept und das Bruchmechanikkonzept. Diese Konzepte haben spezifische Anwendungsgebiete. Das technische Regelwerk beruhte jahrzehntelang fast ausschliesslich auf dem Nennspannungskonzept. Gegenwärtig finden das örtliche Konzept und das Bruchmechanikkonzept mehr und mehr Eingang in das Regelwerk. Während beim Nennspannungskonzept die komplexe, das gesamte Spannungs-Dehnungs-Geschehen im kritischen Werkstoffvolumen (Kerbgrundbereich) enthaltende Übertragungsfunktion zwischen Last und Lebensdauer direkt mit der Bauteilwöhlerlinie für die Nennspannungen gegeben ist, muss sie im örtlichen Konzept rechnerisch durch eine Anzahl relativ aufwändiger Module dargestellt werden. Darin kann ein Grund liegen, dass die Treffsicherheit der Ergebnisse nach bisheriger Erfahrung nicht höher ist als nach dem Nennspannungskonzept.

Mögliche Fehlerquellen in der Berechnungskette des örtlichen Konzeptes:

Lastannahmen

Zu betonen ist, dass eine möglichst genaue Lastannahme die Voraussetzung für eine betriebsfeste Bemessung von Komponenten ist. Fehler bei der Lastannahme können sich auf das Ergebnis einer Lebensdauerberechnung sehr stark auswirken, die Auswirkung kann grösser sein als die aufgrund der mangelhaften Treffsicherheit der verschiedenen Methoden zur Lebensdauerabschätzung. Es empfiehlt sich, eine experimentelle Überprüfung der getroffenen Annahmen einzuleiten. Damit lassen sich die Unsicherheiten der Lastannahmen durch eine nachträgliche Messung beheben. Zumal eine solche Messung zerstörungsfrei durchführbar ist und sich meist auch noch für Folgekonstruktionen als aussagefähig erweist.

Örtliche Beanspruchung

Die örtliche Beanspruchungen können durch Rechnung und/oder Messung gewonnen werden. Es ist notwendig, die Geometrie des Bauteiles exakt zu erfassen, wobei Kerbradien und Wanddicken von besonderer Bedeutung sind. Ebenso muss über einen Konvergenzcheck sicher gestellt werden dass die effektiven Beanspruchungen nicht unterschätzt wurden.

Ein für die betriebliche Praxis noch ungelöstes Problem, Eigenspannungen in einem Bauteilquerschnitt oder in einer Randschicht in ihrer wirksamen Höhe so zu errechnen dass sie in der Überlagerung mit den Lastspannungen bei der Lebensdauerberechnung bewertet werden könnten.

Zusammengesetzte Beanspruchung

Im Falle einer zusammengesetzten Beanspruchung sollte eine Festigkeitsberechnung dem Kriterium der Invarianz (Resultate unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems) genügen. Da in der Regel aber mit unterschiedlichen Neigungen der Wöhlerlinien für Normal- und Schubspannungen

gearbeitet wird, ist die resultierende errechnete Lebensdauer/Schädigung nicht mehr von der Wahl des Koordinatensystems unabhängig.

Werkstoffkennndaten

Da in der Regel die Werkstoffkennndaten nicht ab dem fertigen Bauteil über Messungen bestimmt werden können, ist man auf die Verwendung normierter oder mindestens dokumentierter Werte angewiesen. Dass diese streuen und nicht immer zutreffend sind ist bekannt. Es ist auch nicht möglich, auf der Grundlage der Zugfestigkeit R_m allein zuverlässige Dauerfestigkeitswerte zu ermitteln. In [9] wird eine Abschätzung der Wechselfestigkeit mittels der Dehngrenze R_{p02} angegeben, in der FKM Richtlinie werden die Ermüdungsfestigkeitswerte aus R_m , aber auch über den Typ des Werkstoffes bestimmt.

Zyklisches Verformungsverhalten

Es ist zu prüfen ob zyklische Ver- bzw. Entfestigung vorliegt und damit die Reihenfolge der Belastungszyklen eine massgebende Rolle spielt oder nicht.

Stützwirkung

Zur Erfassung der Stützwirkung werden verschiedene Modelle angewendet. Wie zahlreiche Vergleich zwischen Rechnung und Versuch zeigen, ist die rechnerische Abschätzung der Stützwirkung mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

Fertigungsprozesse

Beim örtlichen Konzept wird vom zyklischen Werkstoffverhalten eines Volumenelementes ausgegangen. Einflüsse der Fertigung, insbesondere die Randschichteneigenschaften Oberflächenrauheit, Werkstoffzustand und Eigenspannungen müssen berücksichtigt werden. Auch hier zeigt die Rechnung gegenwärtig noch deutliche Grenzen auf.

Schädigungsparameter

Zur Erfassung des Mittelspannungseinflusses und des Einflusses der Mehrachsigkeit sind eine Reihe von Schädigungsparametern vorgeschlagen worden. Der bekannteste Schädigungsparameter P_{SWT} entspricht einer Mittelspannungsempfindlichkeit von $M=0.41$, die bei Vergütungsstählen in dieser Grössenordnung liegt, aber bei niedrigfesten Stählen oder z.B. Al-Knetlegierungen ganz andere Werte annimmt. Die Anwendung des P_{SWT} dürfte als Fehlerquelle eine grössere Bedeutung besitzen. Dies schliesst auch die Frage mit ein, inwieweit damit der Einfluss von Eigenspannungen erfasst werden kann, wobei für letztere gilt, dass sie in der Praxis nur in Ausnahmefällen bekannt sind. Schädigungsparameter zur Erfassung der Mehrachsigkeit sind, von proportionaler Beanspruchung abgesehen, noch weitgehende Gegenstand der Forschung. Der Einfluss mehrachsiger Spannungszustände auf die Lebensdauer ist werkstoffabhängig, da je nach Zähigkeit unterschiedliche Schädigungsmechanismen auftreten.

Schadensakkumulation

Die Schadensakkumulation erfolgt in der Praxis fast ausschliesslich nach der linearen Hypothese von Palmgren-Miner. Obwohl die Mängel dieser Hypothese bereits früh bekannt waren, sind in jahrzehntelanger intensiver internationaler Forschung auf diesem Gebiet keine wesentliche Fortschritte erzielt wurde, die zu tolerierbaren Fehlern bei der Lebensdauerberechnung führen. Lediglich sind durch die Bewertung der Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit unterschiedliche Modifikationen vorgeschlagen wurde, die deutlich bessere Ergebnisse als die original Palmgren-Miner Regel, bei der Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit zu keiner Schädigung führen, liefern.

Auch wenn die Methoden der Lebensdauerberechnung für Variantenbeurteilungen und Schwachstellenanalysen erfolgreich eingesetzt werden, ist eine zuverlässige Lebensdauerberechnung für neue Bauteile beim gegenwärtigen Kenntnisstand nicht gegeben. Dies erfordert Strategien, die Rechnung durch spezifische experimentelle Untersuchungen zu validieren und zu kalibrieren. Es sind nach heutigem Kenntnisstand nur relative Lebensdauerprognosen möglich.

3 Umsetzung in KISSsoft

3.1 Hauptmaske

3.1.1 Auswahl der Bauteilform

Wahl der Bauteilform: Es kann zwischen stabförmigen, flächenförmigen und volumenförmigen Bauteilen unterschieden werden. Diese weisen jeweils andere Spannungskomponenten bzw. Spannungsarten und andere Indizierung auf. Bei Anwendung des örtlichen Konzeptes sind in der Regel volumenförmige Bauteile vorhanden. Die ausgewählte Bauteilform beeinflusst die Eingabe für die Spannungskomponenten.

Abbildung 3.1-1 Auswahl des Bauteiltyps: Stabförmiges, flächenförmiges oder volumenförmiges Bauteil in der Hauptmaske.

Stabförmige Bauteile: für stabförmige Bauteile – Stab, Balken, Welle – gilt das folgende bauteilbezogene Koordinatensystem: Die x-Achse liegt in der Stabachse, y- und z-Achse sind die Hauptachsen des Querschnittes, die so festzulegen sind, dass für das Trägheitsmoment $I_y > I_z$ gilt.

Für flächenförmige Bauteile – Scheibe, Platte, Schale – soll im Nachweispunkt das folgende bauteilbezogene Koordinatensystem gelten: x- und y-Achse liegen in der Fläche, die z-Achse ist senkrecht hierzu in Dickenrichtung. Die Normalspannung und die Schubspannungen in Richtung z sollen vernachlässigbar sein.

Volumenförmige Bauteile: es gelten volumenbezogene Koordinatensysteme, zu berechnen sind die Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 . Im Nachweispunkt W an der freien Oberfläche eines volumenförmigen Bauteils sollen die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 in Richtung der Oberfläche wirken, und die Hauptspannung σ_3 weist senkrecht hierzu in das Bauteilinnere. Im allgemeinen bestehen für alle Spannungen ein Spannungsgefälle senkrecht zur Oberfläche und zwei Spannungsgefälle in Richtung der Oberfläche. Aber nur die Spannungsgefälle für σ_1 und σ_2 senkrecht zur Oberfläche können in der Berechnung berücksichtigt werden, nicht aber die Spannungsgefälle für σ_1 und σ_2 in beiden Richtungen der Oberfläche und keines der Spannungsgefälle für σ_3 .

3.1.2 Eingabe der Spannungswerte am Nachweispunkt und am Stützpunkt

Soll die Stützzahl über den Spannungszustand am Stützpunkt bestimmt werden, so werden die Spannungen am Nachweispunkt W und am Stützpunkt B sowie der Abstand des Punktes B vom Punkt W eingegeben werden (Druckspannungen als negative Werte eingeben):

Abbildung 3.1-2 Eingabe der Spannungswerte am Nachweispunkt und am Stützpunkt. Eingabe des Abstandes des Stützpunktes.

3.2 Modulspezifische Einstellungen

3.2.1 Allgemeine Einstellungen

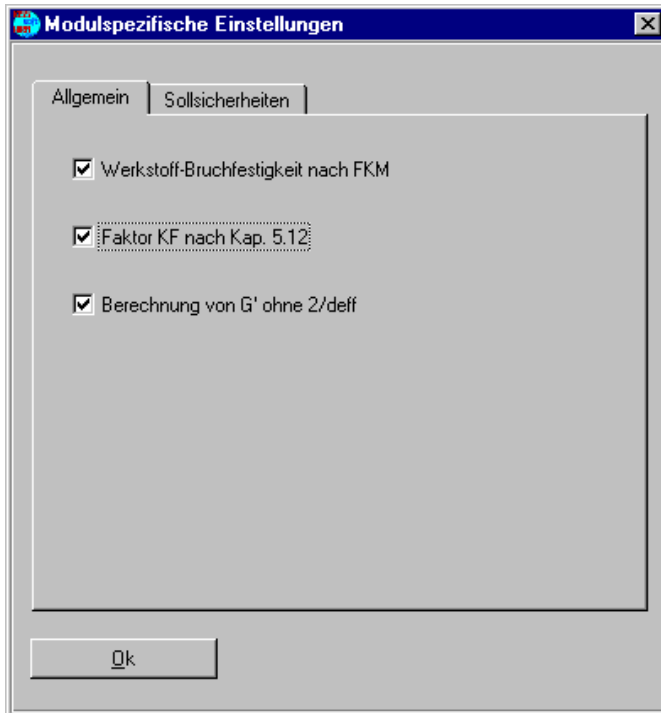


Abbildung 3.2-1 Modulspezifische Einstellungen

Werkstoff-Bruchfestigkeit nach FKM	<p>Die Bauteil-Normwerte R_m und R_p sind aus den Halbzeug- bzw. Probestück-Normwerten $R_{m,N}$ und $R_{p,N}$ oder aus den Bauteil-Zeichnungswert $R_{m,Z}$ zu berechnen. Als Sonderfall können die Bauteil-Istwerte $R_{m,I}$ und $R_{p,I}$ angewendet werden.</p> <p><i>Flag gesetzt:</i> Bauteil-Normwerte R_m und R_p aus den Halbzeug- bzw. Probestück-Normwerten $R_{m,N}$ und $R_{p,N}$ nach Kapitel 3.2.1.1</p> <p><i>Flag nicht gesetzt:</i> Werkstoffwerte werden als Ist Werte aus der KISSsoft Werkstoffdatenbank übernommen und nicht mit $K_{d,m}$ und $K_{d,p}$ abgemindert. Die Werkstoffdatenbank enthält bereits grössenabhängige Werte für R_m und R_p aus Quellen wie z.B. Stahlschlüssel. Siehe Kapitel 3.2.1.3. Dieser Flag kann auch unter den generellen Daten gesetzt werden.</p>	Kapitel 3.2.1
Faktor KF nach Kapitel 5.12	<p>Kerbwirkungszahl als Schätzwert, um bei örtlichen Spannungskonzept eine dem Nennspannungskonzept entsprechende Auswirkung des Rauigkeitsfaktors zu erhalten.</p> <p><i>Flag gesetzt:</i> K_f wird nach Kapitel 5.12 bestimmt.</p> <p><i>Flag nicht gesetzt:</i> Es wird K_f nach Tabelle 4.3.1 verwendet.</p>	Kapitel 4.3.1
Berechnung von G ohne 2/deff	<p>Wird unter Generelle Daten, Eingabe von Daten am Stützpunkt der Flag nicht gesetzt, wird also das bezogene</p>	Kapitel 4.3.2.1

	<p>Spannungsgefälle näherungsweise berechnet, so erfolgt die Berechnung des bezogenen Spannungsgefälle nach den Gleichungen 4.3.17 bestimmt. Diese enthalten Terme für Zug/Druck, Torsion und für Biegung. Falls keine Biegung vorhanden ist, ist es fraglich ob der zweite Term (2/d) in den Formeln Sinn macht. Die hiermit programmierte Option ist in der FKM Richtlinie nicht vorgesehen!</p> <p><i>Flag gesetzt:</i> das Spannungsgefälle wird ohne den zweiten Term der Formel 4.3.17 bestimmt.</p> <p><i>Flag nicht gesetzt:</i> das Spannungsgefälle wird mit dem zweiten Term der Formel 4.3.17 bestimmt.</p>	
--	---	--

Abbildung 3.2-2 Modulspezifische Einstellungen

3.2.2 Sollsicherheiten

Die FKM Richtlinie ist eine der wenigen Rechenvorschriften die Sollsicherheiten in Abhängigkeit der Schadensfolge etc. aufführt. Sie gelten zusammen mit sicheren Lastannahmen und einer mittleren Überlebenswahrscheinlichkeit der Festigkeitskennwerte $P_u=97.5\%$ für geschweisste wie auch für nichtgeschweisste Bauteile.

Basierend auf dem ausgewählten Material und den definierten Schadensfolgen, Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Last, Inspektion und Prüfung werden Sicherheitszahlen bestimmt. Dabei wird zwischen Stahl, Eisengusswerkstoff (duktil oder nichtduktil) sowie Aluminiumwerkstoff (duktil oder nichtduktil) – also zwischen fünf Klassen - unterschieden. Alternativ können die Sicherheitszahlen auch manuell gesetzt werden.

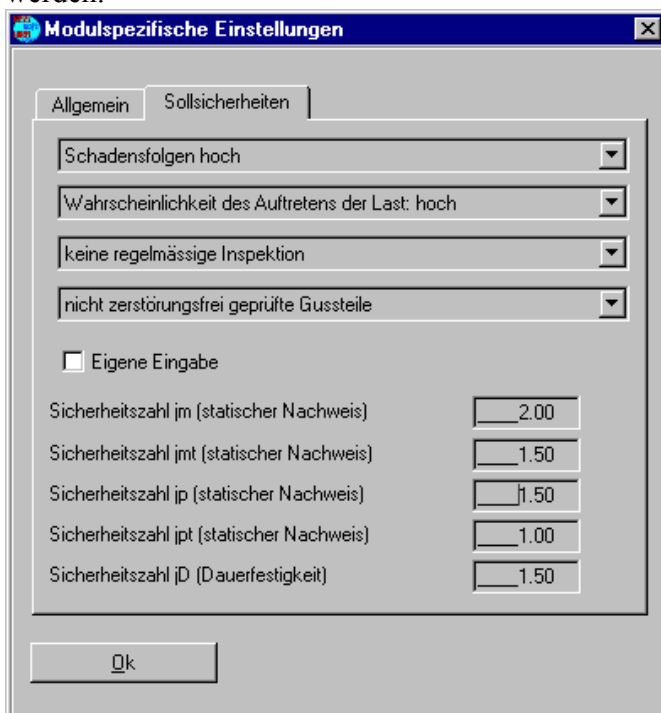


Abbildung 3.2-3 Auswahl der Sicherheiten nach Werkstück- und Lasteigenschaften

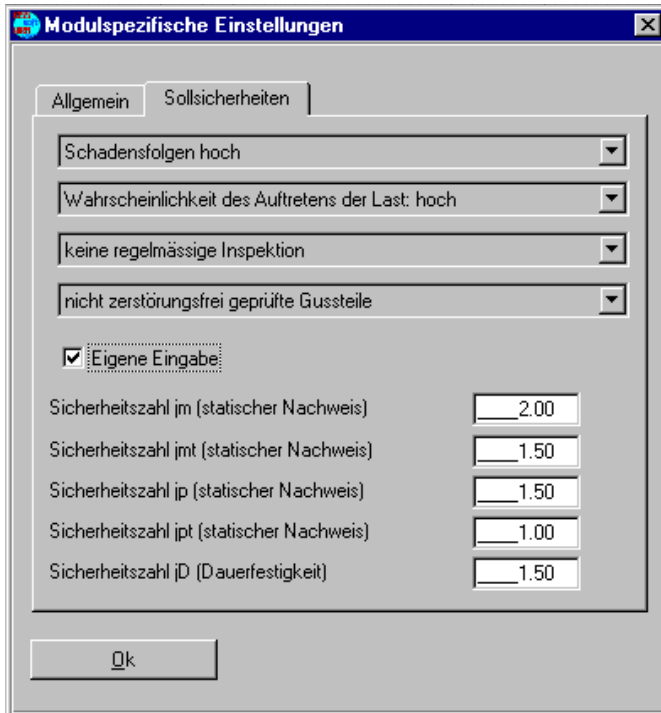


Abbildung 3.2-4 Eingabe der Sicherheiten.

Sicherheitszahl	Erklärung
jm	Sicherheitsfaktor gegen die Zugfestigkeit
jmt	Sicherheitsfaktor gegen die Zeitstandfestigkeit
jp	Sicherheitsfaktor gegen die Fließgrenze
jpt	Sicherheitsfaktor gegen die Zeitdehngrenze
jD	Sicherheit gegenüber der Dauerfestigkeit

Tabelle 3.2-1 Sicherheitszahlen für den statischen und Ermüdungsnachweis.

3.3 Generelle Daten

3.3.1 Allgemeine Eingaben

Abbildung 3.3-1 Eingabe genereller Daten

Flag		
Eingabe von Daten am Stützpunkt	<p><i>Flag gesetzt:</i> Stützziffer/bezogenes Spannungsgefälle wird über den Spannungszustand im Stützpunkt definiert. Dazu müssen die Spannungswerte und der Abstand zwischen Auswerte- und Stützpunkt in der Hauptmaske eingetragen werden</p> <p><i>Flag nicht gesetzt:</i> Die Stützziffer/bezogenes Spannungsgefälle wird nicht über die Werte an einem Stützpunkt bestimmt. Das bezogene Spannungsgefälle an der Stelle der maximalen Spannung wird näherungsweise nach Formel 4.3.17 berechnet. Dazu müssen zwei Radien (Radius 1 und Radius 2) definiert werden (für die beiden Richtungen der Oberfläche), sowie eine typische Bauteilabmessung d. Siehe auch: modulspezifische Einstellung, Berechnung von G ohne 2/deff oben.</p>	Kapitel 4.3.2.1, Formel 4.3.17, Fussnote 12 (Seite 110)
Belastungsrichtung wie angegeben	<p><i>Flag gesetzt:</i> Die Berechnung wird für synchrone Spannungen durchgeführt.</p> <p><i>Flag nicht gesetzt:</i> Die Berechnung wird für nicht-synchrone Spannungen durchgeführt.</p> <p>Es darf angenommen werden, dass diese Vorgehensweise</p>	Kapitel 4.1.0, 5.10

	auf der sicheren Seite liegt.	
Werkstoff- Bruchfestigkeit nach FKM	<p>Die Bauteil-Normwerte R_m und R_p sind aus den Halbzeug- bzw. Probestück-Normwerten $R_{m,N}$ und $R_{p,N}$ oder aus den Bauteil-Zeichnungswert $R_{m,Z}$ zu berechnen. Als Sonderfall können die Bauteil-Istwerte $R_{m,I}$ und $R_{p,I}$ angewendet werden.</p> <p><i>Flag gesetzt:</i> Bauteil-Normwerte R_m und R_p aus den Halbzeug- bzw. Probestück-Normwerten $R_{m,N}$ und $R_{p,N}$ nach Kapitel 3.2.1.1</p> <p><i>Flag nicht gesetzt:</i> Werkstoffwerte werden als Ist Werte aus der KISSsoft Werkstoffdatenbank übernommen und nicht mit $K_{d,m}$ und $K_{d,p}$ abgemindert. Die Werkstoffdatenbank enthält bereits grössenabhängige Werte für R_m und R_p aus Quellen wie z.B. Stahlschlüssel. Siehe Kapitel 3.2.1.3. Dieser Flag kann auch unter den modulspezifischen Einstellungen gesetzt werden.</p>	Kapitel 3.2.1

Tabelle 3.3-1 Flags

Lastwechselzahl	Lastwechselzahl. Ist Berechnung nach Miner elementar gewählt, so ergeben Eingaben grösser als N_D konstante Ausnutzungen.	
Temperatur	Eingabe der Temperatur in Celsius. Der Anwendungsbereich der FKM Richtlinie ist je nach Werkstoff begrenzt, siehe Kapitel 1.1. Basierend auf der Temperatur und dem Werkstofftyp wird der Temperaturfaktor $K_{T,D}$ bestimmt.	Kapitel 4.2.3
Temperaturdauer	Dauer während der das Bauteil der Temperatur ausgesetzt ist.	
Schutzschichtdicke Aluminium	Der Schutzschichtfaktor K_S (der über die Schutzschichtdicke bestimmt wird) berücksichtigt den Einfluss einer Schutzschicht auf die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteiles aus Aluminiumwerkstoff.	Kapitel 4.3.4, Bild 4.3.4
Oberflächenverfestigung KV	Der Randschichtfaktor K_V berücksichtigt den Einfluss einer Randschichtverfestigung auf die Ermüdungsfestigkeit.	Kapitel 4.3.4, Tabelle 4.3.5

3.3.2 Wöhlerlinie

Wöhlerlinie		
Miner elementar	Falls keine Einstufenspannung vorliegt, sondern ein Spannungskollektiv, ist die Berechnung in der Regel nach dem Verfahren Miner elementar durchzuführen.	Kapitel 4.4.3.1
Miner konsequent	Im Verfahren Miner konsequent (von Haibach hergeleitet, siehe [10]) ist berücksichtigt, dass die Bauteil-Dauerfestigkeit mit zunehmender Schädigung geringer wird. Die Verringerung gilt ab $N_{D,\sigma}=1 \cdot 10^6$.	Kapitel 4.4.3.1

Tabelle 3.3-2 Wöhlerlinien

3.3.3 Überlastungsfälle

Im Dauerfestigkeitsdiagramm können mit verschiedenen Annahmen unterschiedliche Gestaltsausschlagfestigkeiten σ_{GA} ermittelt werden. Es ergibt sich bei Annahme von $\sigma_m = \text{const.}$ Ein grösseres σ_{GA} als bei $R = \text{const.}$ Ursache ist, dass die Grenzlinien im Smith Diagramm unter einem Winkel $< 45^\circ$ ansteigen (Mittelspannungsempfindlichkeit ψ). Welche Annahme zutrifft ist abhängig von der zu erwartenden Änderung der Spannungen im Bauteil bei zulässiger Ermüdungsbelastung im Betrieb. Die Wahl des Überlastungsfalles kann also entscheiden ob ein Bauteil überlastet ist oder nicht [11].

Beanspruchungsfall	
Überlastfall F1 (Mittelspannung konstant)	Bei konstanter Mittelspannung vergrößert sich die Ausschlagspannung mit Vergrößerung der massgebenden Betriebslast
Überlastfall F2 (Spannungsverhältnis konstant)	Bei Vergrößerung der Betriebslast bleibt das Verhältnis von maximaler zu minimaler Spannung gleich. Dieser Überlastungsfall liefert in der Regel konservative Ergebnisse (verglichen mit den anderen Überlastungsfälle) und sollte daher in Zweifelsfällen angewendet werden.
Überlastfall F3 (Minimalspannung konstant)	Bei Vergrößerung der Betriebslast bleibt die minimale Belastung gleich.
Überlastfall F4 (Maximalspannung konstant)	Bei Vergrößerung der Betriebslast bleibt die maximale Belastung gleich.

Tabelle 3.3-3 Überlastfälle

3.4 Spannungsverhältnisse

Im R-Wert ist die Eingabe der Mittelspannung codiert. Im Vergleich zum mittelspannungsfreien Fall (Wechselbeanspruchung, R=-1) wird die Wöhlerlinie bei Versuchen mit Druckmittelspannungen zu höheren ertragbaren Spannungsamplituden, bei Versuchen mit Zugmittelspannungen dagegen zu kleineren ertragbaren Spannungsamplituden hin verschoben. Die Abhängigkeit der ertragbaren Spannungsamplitude von der Mittelspannung ist werkstoffspezifisch und wird als Mittelspannungseinfluss bezeichnet. Diese steigt in der Regel mit der Zugfestigkeit des Werkstoffes.

Der R-Wert (Spannungsverhältnis) ist in der Software als

$$R_{\sigma,i} = \frac{|\sigma_{m,i}| - \sigma_{a,i}}{|\sigma_{m,i}| + \sigma_{a,i}}$$

definiert. Die Definition weicht damit ab von der üblichen Definition der Form

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

Damit wird erreicht, dass der R-Wert von -1 bis +1 und nicht von $-\infty$ bis +1 variiert (vergleiche K-Wert wie in DIN 15018). Konstant entspricht dann R=1, schwelend R=0 und wechselnd R=-1. Die Information darüber ob im Druck- oder Zugbereich gearbeitet wird steckt im Vorzeichen der Spannung.



Abbildung 3.4-1 Eingabe der R-Werte für alle drei Spannungen



Abbildung 3.4-2 Eingabe eines numerischen R-Wertes

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen, nach FKM- Richtlinie

KISSsoft/Hirware-Modul: Festigkeit mit örtlichen Spannungen (K12)

Datei Projekt Protokoll Einstellungen Hilfe

Haupt-Eingabedaten


Volumenförmige Bauteile (sigma_1, sigma_2, sigma_3) Generelle Daten

	Nachweispunkt	Stützpunkt	R	Lastkollektiv	plast. Stützzahl
sigma 1	<input type="text" value="0.00"/> N/mm2	<input type="text" value="0.00"/> N/mm2	<input type="text" value="0.00"/>	Einstufenbeanspruchung (kein Kollektiv)	<input type="text" value="1.00"/>
sigma 2	<input type="text" value="0.00"/> N/mm2	<input type="text" value="0.00"/> N/mm2	<input type="text" value="-1.00"/>	Einstufenbeanspruchung (kein Kollektiv)	<input type="text" value="1.00"/>
sigma 3	<input type="text" value="0.00"/> N/mm2	<input type="text" value="0.00"/> N/mm2	<input type="text" value="1.00"/>	Einstufenbeanspruchung (kein Kollektiv)	

Abstand zum Stützpunkt mm Radius 1 mm
 Radius 2 mm

Werkstoff + Rz

Rohdurchmesser mm

Resultate konsistent 

Resultat-Übersicht

Statische Ausnutzung %
 Dynamische Ausnutzung %

▪ Projekt: Anwender:

Abbildung 3.4-3 Eigene Eingabe des R-Wertes.

3.5 Rauhigkeit

Der Rauheitsfaktor berücksichtigt den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils. Er wird experimentell aus den Dauerfestigkeiten ungekerbter Proben mit und ohne Oberflächenrauheit abgeleitet und in Abhängigkeit von der Rautiefe R_z und der Zugfestigkeit R_m des Werkstoffes dargestellt; für polierte Oberflächen hat er den Wert 1.0.
Für Walz-, Schmied- und Gusschaut gilt die mittlere Rauheit $R_z=200\mu\text{m}$.

Mit zunehmender Rauhtiefe verschiebt sich die Wöhlerlinie zu kleineren Spannungsamplituden, jedoch ist die Rauhtiefe nicht allein ausschlaggebend. Vielmehr wird die Festigkeit auch massgeblich durch die Art der Oberflächenfeingestalt mitbestimmt. Verschiedenartige Bearbeitungsverfahren können darüber hinaus trotz ähnlicher Oberflächenfeingestalt und gleicher Rauhtiefe infolge unterschiedlicher Eigenspannungszustände zu stark voneinander abweichenden Wöhlerlinien führen.

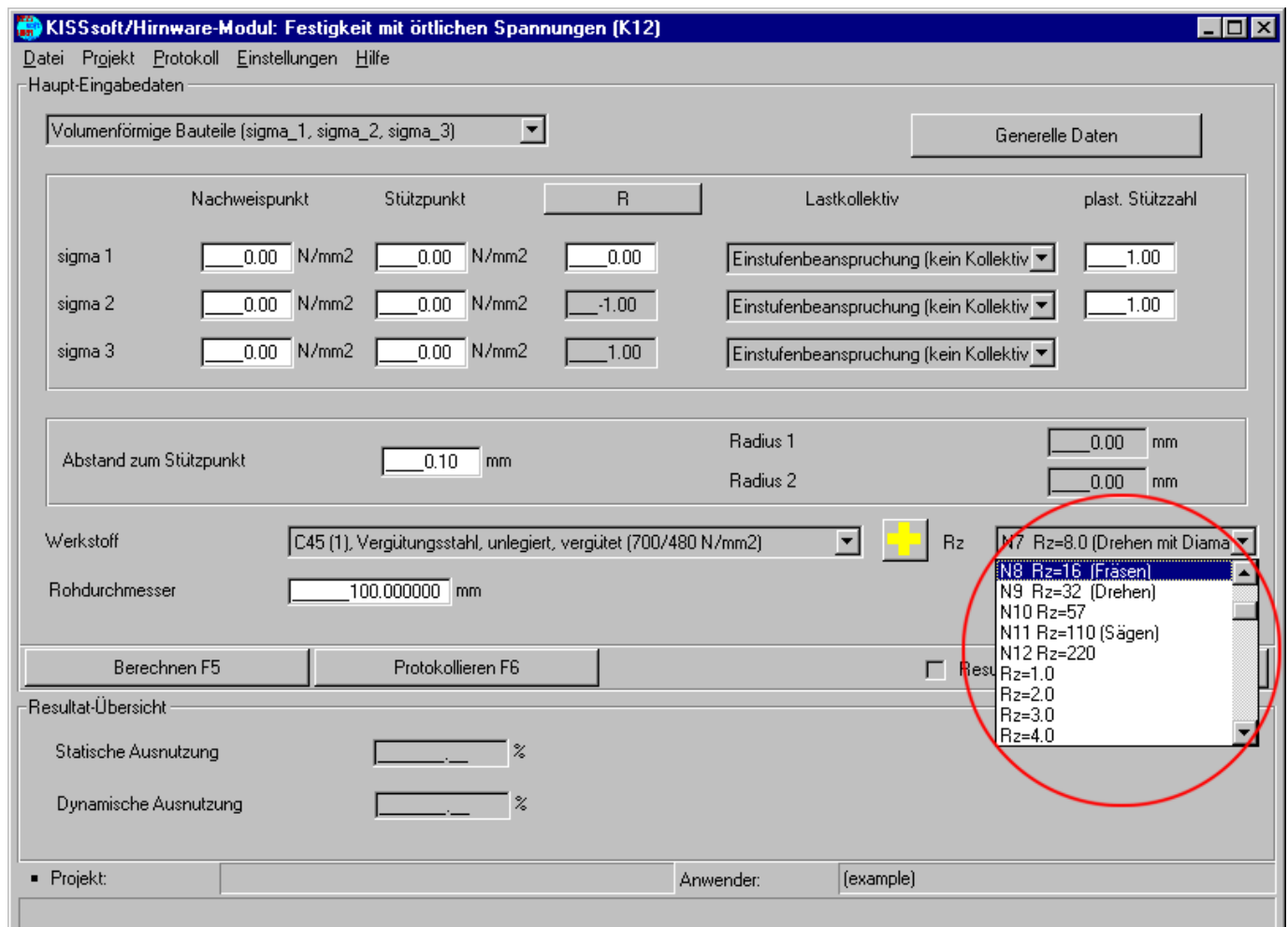


Abbildung 3.5-1 Wahl der Oberflächenrauheit über Oberflächengüte oder direkt über Rauigkeit.

3.6 Kollektive

KISSsoft/Hirware-Modul: Festigkeit mit örtlichen Spannungen (K12)

Datei Projekt Protokoll Einstellungen Hilfe

Haupt-Eingabedaten

Volumenförmige Bauteile (sigma_1, sigma_2, sigma_3) Generelle Daten

	Nachweispunkt	Stützpunkt	R	Lastkollektiv	plast. Stützzahl
sigma 1	0.00 N/mm2	0.00 N/mm2	0.00	Einstufenbeanspruchung (kein Kollektiv)	1.00
sigma 2	0.00 N/mm2	0.00 N/mm2	-1.00	Einstufenbeanspruchung (kein Kollektiv)	1.00
sigma 3	0.00 N/mm2	0.00 N/mm2	1.00	Belastungskollektiv 1 nach DIN15020	

Abstand zum Stützpunkt: 0.10 mm Radius 1: 0.00 mm Radius 2: 0.00 mm

Werkstoff: C45 (1), Vergütungsstahl, unlegiert, vergütet (700/480 N/mm2) Rz: N7 Rz=8.0 (Drehen mit Diamo)

Rohdurchmesser: 100.000000 mm

Berechnen F5 Protokollieren F6 Resultate konsistent

Resultat-Übersicht

Statische Ausnutzung: %
Dynamische Ausnutzung: %

Projekt: Anwender: (example)

Abbildung 3.6-1 Auswahl von Kollektiven.

3.7 Materialdatenbank

4 Menüs

4.1 Datei

Neu	Erzeugt neue Datei
Öffnen	Öffnet bestehende Datei
Speichern	Speichert Datei
Speichern als	Speichert Datei unter einem anderen Namen
Löschen	Löscht Datei
Berechnen	Führt Berechnung aus
Schnittstelle	Ein- / Auslesen von Daten über Schnittstellen
Berechnung beenden	Beendet KISSsoft Modul

Tabelle 4.1-1 Befehle im Menü Datei

4.2 Projekt

Neu	Neues Projekt (Arbeitsverzeichnis) erstellen
Öffnen	Bestehendes Projekt öffnen
Standard speichern	Bestehende Eingaben als Standard übernehmen

Tabelle 4.2-1 Befehle im Menü Projekt

4.3 Protokoll

Letztes Protokoll ansehen	Letztes Protokoll wird angezeigt
Protokollvorlage wählen	Wahl der Protokollvorlage (es können eigene Vorlagen erstellt/verwendet werden)
Protokollieren	Protokoll starten

Tabelle 4.3-1 Befehle im Menü Protokoll

4.4 Einstellungen

Modul-Spezifisch	Siehe Kapitel 3.2
Allgemeines	Allgemeine Einstellungen
Protokoll	Nicht aktiv
Ausgabe	Nicht aktiv

Tabelle 4.4-1 Befehle im Menü Einstellungen

4.5 Hilfe

Hilfe-Index	Aufruf der Hilfe/Handbuch
Hilfe für Hilfefunktion	Nicht aktiv
Info über KISSsoft	Informationen zur Version, Anschrift des Herstellers, Tel. Nr. Hotline

Tabelle 4.5-1 Befehle im Menü Hilfe

5 Geplante Erweiterungen

5.1 Nachweise mit Nennspannungen

Erweiterung der bestehenden Software um den statischen und Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen (Kapitel 1 und 2 der FKM-Richtlinie).

Der Nachweis für Wellen/Achsen/Bolzen nach dem Nennspannungskonzept ist in KISSsoft bereits realisiert.

5.2 Kollektive

Bereitstellen von Hilfsmitteln um Kollektive zu erstellen. Aufnahme standardisierter Kollektive.

5.3 Anbindung an FEM Pakete

Einbau des Modules in Postprozessoren.