

Werner Koehldorfer

Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5

Berechnung von Bauteilen und Baugruppen
in der Konstruktion



HANSER

Werner Koehldorfer
Finite-Elemente-Methoden
mit CATIA V5
Berechnung von Bauteilen und
Baugruppen in der Konstruktion



Bleiben Sie einfach auf dem Laufenden:
www.hanser.de/newsletter
Sofort anmelden und Monat für Monat
die neuesten Infos und Updates erhalten.

Werner Koehldorfer

Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5

Berechnung von Bauteilen und
Baugruppen in der Konstruktion

HANSER

Der Autor:

Dipl.-Ing. Werner Koehldorfer ist Dozent an der HTBL-Bulme Graz im Bereich Maschinenbau-Konstruktion. Darüber hinaus ist er Schulungsleiter für die 3D-CAD Gruppe CATIA der österreichischen HTLs.

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ISBN 3-446-22872-1

© 2004 Carl Hanser Verlag München Wien

Gesamtlektorat: Sieglinde Schörl

Herstellung: Monika Kraus

Copy-editing: Manfred Sommer, München

Titellillustration: Atelier Frank Wohlgemuth Bremen

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, Rebranding, München, Germany

Umschlaggestaltung: MCP · Susanne Kraus GbR, Holzkirchen

Datenbelichtung, Druck und Bindung: Kessel, Krugzell

Printed in Germany

www.hanser.de/cad

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Arbeitsumgebungen	1
1.2	Aufbau des Buches	2
1.3	Internet-Link	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Finite Elemente des elastischen Kontinuums - Verschiebungsansatz	4
2.2	Beispiel einer FEM-Berechnung	7
3	Arbeitsumgebung GPS	11
3.1	Vorbereitung einer GPS-Analyse	13
3.2	Die Materialbibliothek	13
3.2.1	Anlegen einer neuen Materialfamilie	15
3.2.2	Anlegen eines neuen Materials	15
3.2.3	Sonstige Icons in der Material Library	15
3.2.4	Beispiel Material Library	15
3.2.5	Pfadeingabe für den neuen Materialkatalog	18
3.2.6	Materialzuordnung	20
3.3	Vorgangsweise bei der Berechnung	22
3.3.1	Definition der gewünschten FEM-Analyse	22
3.3.1.1	Statikanalyse	23
3.3.1.2	Frequenzanalyse	23
3.3.1.3	Freie Frequenzanalyse	23
3.4	Einstiegsbeispiel für GPS	24
3.4.1	Aufgabenbeschreibung	24
3.4.2	Öffnen des Startmodells	25
3.4.3	Auswahl des Analyseprozesses	25
3.4.4	Randbedingungen zur Bauteillagerung	25
3.4.4.1	Definition der Belastung	27

3.4.4.2	Durchführung der Berechnung.....	28
3.4.4.3	Darstellung der Ergebnisse.....	29
3.4.4.4	Auswertung der Ergebnisse(Plausibilit tsprüfung)	29
3.4.4.5	Modifikation (Verfeinerung) der Vernetzung.....	30
3.4.4.6	Neuerliche Berechnung und Auswertung	31
3.5	Standardeinstellungen für GPS	34
3.5.1	Spannungen in der Einheit MPa	34
3.5.2	Generelle Standardeinstellungen von GPS	35
3.5.3	Festlegen der Speichereinstellungen.....	37
3.6	Der CATIA ELFINI Solver	38
3.7	M glichkeiten der Vernetzung.....	39
3.7.1	Beam-Elemente (1D-Elemente)	39
3.7.2	Schalen Elemente (2D-Elemente)	39
3.7.3	Tetraeder-Elemente (3D-Elemente).....	40
4	Definition der Randbedingungen	41
4.1	Bedingungen direkt auf Bauteilgeometrie	42
4.1.1	Feste Einspannung	43
4.1.2	Fl chenloslager	44
4.1.2.1	Ebenes Gleitlager.....	44
4.1.2.2	Rotatorische Gleitlager	45
4.1.3	Erweiterte Bedingung (Allgemeine Definition).....	46
4.1.3.1	CATIA-Koordinatensysteme	47
4.1.3.2	Globales Koordinatensystem	48
4.1.3.3	Implizite Koordinatensysteme.....	48
4.1.3.4	User-Koordinatensysteme.....	49
4.1.4	Isostatische Randbedingung.....	50
4.2	Virtuelle Elemente	50
4.2.1	Starres virtuelles Teil	51
4.2.2	Bewegliches virtuelles Teil	53
4.2.3	Virtuelles Kontaktteil	53
4.2.4	Beispiel zur Anwendung virtueller Teile	54
4.2.4.1	Lagerung mit starrem virtuellem Teil	55
4.2.4.2	Lagerung mit beweglichem virtuellem Teil	59
4.2.4.3	Lagerung mit virtuellem Kontaktteil	62
4.2.5	Virtuelles Teil mit starrer Feder.....	64
4.2.6	Virtuelles Teil mit beweglicher Feder	65

4.3	Randbedingungen über virtuelle Teile.....	66
4.3.1	Loslager.....	67
4.3.2	Gleitdrehpunkt	68
4.3.3	Kugelgelenkverbindung.....	68
4.3.4	Drehpunkt.....	69
4.4	Zusammenfassende bersicht.....	70
4.5	Berücksichtigung von Bauteilsymmetrien	70
4.5.1	Symmetrierandbedingung	71
4.5.2	Periodizitätsbedingung	71
5	Definition der Lasteinleitung	75
5.1	Druck.....	76
5.2	Verteilte Last	78
5.3	Moment.....	81
5.4	Lagerlast.....	84
5.5	Importierte Kraft.....	85
5.6	Importiertes Moment.....	87
5.7	Streckenlast	87
5.8	Flächenlast.....	88
5.9	Körperkraft	90
5.10	Dichte der Kraft	91
5.11	Beschleunigung.....	92
5.12	Rotation	93
5.13	Erzwungene Verschiebung	95
5.14	Temperaturfeld	98
5.15	Zusammenfassende bersicht.....	103
6	Durchführung der Berechnungen	105
6.1	Erster Rechenschritt	105
6.2	Netzverfeinerung und weitere Berechnung	107
6.3	Überprüfung der Genauigkeit	110
6.4	Strategien bei der FEM-Analyse	114

Inhalt

6.4.1	Qualitative Prüfung der Ergebnisse	114
6.4.2	Variantenvergleich bei verfeinertem Netz.....	114
6.4.3	Lokale Spannungsuntersuchungen	114
6.5	Berechnungsmethoden im ELFINI-Solver	115
6.5.1	Der Gauß-Algorithmus	116
6.5.2	Das Gradientenverfahren	116
6.6	Verfügbare FEM-Analysen	116
6.6.1	Statischer Prozess	117
6.6.2	Durch die Statik erzwungene Frequenzen	117
6.6.3	Frequenzprozess.....	118
6.6.3.1	Beispiel Frequenzanalyse Zylindergehäuse.....	119
6.6.3.2	Freie Frequenzanalyse Zylindergehäuse.....	126
6.6.3.3	Symbolleiste Masse	128
6.6.4	Beulprozess.....	129
6.6.5	Kombinierter Prozess	134
6.6.6	Dynamische Antwort	137
7	Auswertung der Ergebnisse	139
7.1	Darstellung des Netzes.....	139
7.2	VonMises-Vergleichsspannungen.....	140
7.3	Darstellung der Verformungen	145
7.4	Darstellung der Hauptspannungen	147
7.4.1	Die Normalspannungshypothese	149
7.4.2	Die Schubspannungshypothese	149
7.4.3	Die Gestaltänderungsenergiehypothese.....	149
7.5	Darstellung der Genauigkeit	155
7.6	Analysetools.....	156
7.6.1	Animieren.....	157
7.6.2	Schnittebenenanalyse	157
7.6.3	Maßstabsfaktor der Verformung.....	158
7.6.4	Extremwert bei Bild	158
7.6.5	Informationen	159
7.6.6	Bildlayout	160
7.7	Symbolleiste Analyseergebnisse.....	161
7.7.1	Bericht der Basisanalyse.....	161
7.7.2	Verbesserter Bericht.....	162
7.7.3	Protokoll der Berechnungen	164
7.7.4	Listenbericht.....	164

7.8	Sensoren	165
7.8.1	Reaktionssensor	165
7.8.2	Globaler Sensor.....	166
7.8.3	Lokaler Sensor	167
7.8.4	Werte für Sensoren anzeigen.....	170
8	Verfügbare Finite Elemente	171
8.1	1D-Elemente (Balkenelemente).....	171
8.1.1	Vorgangsweise bei der Vernetzung.....	171
8.1.2	Zuordnung von Eigenschaften	172
8.1.3	Berechnung mit Balkenelementen	176
8.2	2D-Elemente (Schalenelemente)	177
8.2.1	Vorgangsweise bei der Vernetzung.....	179
8.2.2	Zuordnung der Eigenschaften	180
8.2.3	Berechnung mit Schalenelementen.....	181
8.2.4	Definition verschiedener Wandstärken.....	182
8.3	Viereckige Schalenelemente(2D-Elemente).....	183
8.3.1	Vernetzung mit viereckigen Schalenelementen	184
8.3.2	Qualität des Netzes überprüfen	189
8.3.3	Netz editieren.....	192
8.3.4	Berechnung mit Schalenelementen.....	194
8.4	3D-Elemente (Tetraeder-Elemente).....	196
8.4.1	Lineare Tetraeder-Elemente (TE4)	196
8.4.2	Das parabolische Tetraeder-Element (TE10).....	197
8.4.3	Unterschiede von TE4- und TE10-Elementen.....	198
8.5	Hexaeder-Elemente (3D-Elemente)	198
9	Anwendungsbeispiele GPS	203
9.1	Stahlplatte mit Bolzenverbindung	203
9.2	Kipphebel.....	209
9.3	Sicherungsring	215
9.4	Optimierung eines Zylindergehäuses.....	221
9.4.1	Konstruktionsvariante 1	221
9.4.2	Konstruktionsvariante 2	227
9.4.3	Konstruktionsvariante 3	229
9.4.4	Konstruktionsvariante 4	231

10	Baugruppenberechnung (GAS)	235
10.1	Bedingungen in der Baugruppe	235
10.1.1	Bedingungen im Assembly Design	235
10.1.2	Analysis-Connection Bedingungen	236
10.1.2.1	Verbindung mit Flächenkontakt(Analysis Connect)	238
10.1.2.2	Allgemeine Verbindung ohne Flächenkontakt	239
10.1.2.3	Punktschweißverbindung	241
10.1.2.4	Schweißnahtverbindung	242
10.2	Verbindungen zwischen zwei Teilen	243
10.2.1	Eigenschaft der fixierten Verbindung	244
10.2.2	Eigenschaft der Gleitverbindung	245
10.2.3	Eigenschaft der Kontaktverbindung	246
10.2.4	Eigenschaft der fixierten Federverbindung	247
10.2.5	Eigenschaft der Presspassverbindung	248
10.2.6	Eigenschaft der Schraubenverbindung	249
10.3	Ferne Verbindungen	250
10.3.1	Starre Verbindung	250
10.3.2	Bewegliche Verbindung	252
10.3.3	Verbindung mit virtuellem Festdrehen von Bolzen	254
10.3.4	Verb. mit virtuellem Festdrehen von Federbolzen	255
10.3.5	Benutzerdefinierte Verbindung	257
10.3.5.1	Start	257
10.3.5.2	Mitte	258
10.3.5.3	Ende	258
10.4	Schweißverbindungen	260
10.4.1	Definition eines benutzerdefinierten Materials	260
10.4.2	Die Punktschweißverbindung	261
10.4.3	Nahtschweißverbindung	264
10.5	Übersicht der Baugruppenverbindungen	267
11	Anwendungsbeispiele zu Baugruppen	269
11.1	Abtriebswelle mit Riemenscheibe	269
11.2	Punktschweißverbindung	283
11.3	Schweißnahtverbindung	292
11.4	Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors	299

12	Hinweise für die Anwender	317
12.1	Verwendung der Intel MKL-Library.....	317
12.2	Modellprüfprogramm	318
12.3	Elemente gruppieren	319
12.4	Speichern und Versenden von Ergebnisdaten	321
12.5	Optimierung von Bauteilen (Knowledgeware).....	323
12.6	Schnittstellen zu anderen Produkten.....	328
12.7	Allgemeine Hinweise.....	328
	Literaturverzeichnis.....	331
	Index	333

1 Einleitung

Ziel dieses Buches ist es, allen Konstrukteuren, die mit CATIA V5 arbeiten, die Berechnungsmöglichkeiten von Bauteilen und Baugruppen mit dem FEM-Modul vorzustellen.

Es ist für den Konstrukteur von entscheidender Bedeutung, in der Konstruktionsphase eine Vordimensionierung der Bauteile vorzunehmen, um ein den Anforderungen gerechtes und kostenoptimiertes Produkt zu entwickeln. Eine detaillierte Strukturanalyse, die oft erst von speziellen Abteilungen in einem Unternehmen im Anschluss an die Konstruktion durchgeführt wird, erfordert sehr viel Zeit und bringt viele Schnittstellenprobleme mit sich.

Es empfiehlt sich daher, bereits in der Konstruktionsphase eine FEM-Analyse durchzuführen. Dazu ist ein einfach zu handhabendes Programm erforderlich, das nach Möglichkeit die gleiche Datenbasis wie die Konstruktion verwendet.

Das CAX-System CATIA V5 bietet ein solches Analysemodul. Es können damit einfache FEM-Berechnungen bis hin zu einer detaillierten Strukturanalyse durchgeführt werden. Der große Vorteil besteht in der einfach zu handhabenden intuitiven Benutzeroberfläche und im gänzlichen Wegfall der Schnittstellenproblematik. Die FEM-Berechnungen werden mit den Daten der Konstruktion durchgeführt, Verbesserungen können sofort einfließen und unterschiedliche Varianten auf einfache Weise verglichen werden.

1.1 Arbeitsumgebungen

In CATIA V5 gibt es mehrere Arbeitsumgebungen im Bereich der FEM-Analyse. Diese sind:

- Die GPS-Arbeitsumgebung (Generative Part Structural Analysis)
- Die GAS-Arbeitsumgebung (Generative Assembly Structural Analysis)

Diese beiden Arbeitsumgebungen haben eine gemeinsame Oberfläche, und die verfügbaren Funktionalitäten hängen von der jeweils vorhandenen Lizenz ab. Beide gehören zum Bereich der Analyse und Simulation.

1 Einleitung

Die weiteren Arbeitsumgebungen im FEM-Bereich sind:

- Die Arbeitsumgebung 'Analysis Connection'
- Die Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools'

Die Arbeitsumgebung 'Analysis Connection' ermöglicht die Definition von Analyseverbindungen für eine Baugruppenberechnung und ist ab Releaseversion 12 in die GAS-Arbeitsumgebung eingebunden.

Die Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools' bietet die Möglichkeit, ein FEM-Netz selbst zu generieren. Dazu stehen alle gängigen finiten Elemente zur Verfügung.

In diesem Buch wird detailliert auf die einzelnen Arbeitsumgebungen eingegangen und die angebotenen Funktionen werden beschrieben.

1.2 Aufbau des Buches

Das Buch beginnt mit einer kurzen Erläuterung der theoretischen FEM-Berechnungsgrundlagen. Danach wird der Aufbau der GPS-Oberfläche erklärt. Im Anschluss daran werden die notwendigen Arbeitsschritte bei der Durchführung einer FEM-Analyse beschrieben. Diese beginnen mit der Materialdefinition und gehen über die Definition der Randbedingungen sowie der Lasteinleitung bis zur Berechnung und Auswertung der Ergebnisse. Es erfolgt auch eine genaue Beschreibung der verfügbaren finiten Elemente.

Anhand von Übungsbeispielen werden die FEM-Berechnungen sowie die möglichen Analyseprozesse erklärt.

Weiters wird auf die Berechnung von Baugruppen eingegangen. Es werden die Möglichkeiten zur Definition der mechanischen Bauteilverbindungen beschrieben. Abschließend werden komplexere Übungsbeispiele zu dieser Thematik behandelt.

Das Buch schließt mit allgemeinen Hinweisen und Tipps für die Anwender.

1.3 Internet-Link

Sämtliche Daten für eine eigenständige Durchführung der beschriebenen Übungsbeispiele finden Sie auf der Internetseite des Carl Hanser Verlages unter folgender Adresse:

<http://downloads.hanser.de>

Ein Verweis auf die gerade benötigte Datei befindet sich bei jedem Übungsbeispiel.

2 Theoretische Grundlagen

Die FEM entspricht in ihrem methodischen Vorgehen sehr der Denk- und Arbeitsweise des Ingenieurs. Im Bereich naturwissenschaftlicher Untersuchungen ist es oft nicht möglich, stark verflochtene Zusammenhänge in komplizierten Systemen als Ganzes zu erfassen. Daher gehen Techniker und Naturwissenschaftler beim Behandeln derartiger Sachverhalte üblicherweise so vor, dass sie ein zu untersuchendes System zunächst in mehrere Elemente aufgliedern, sodann das Verhalten dieser Elemente betrachten, um schließlich im Ergebnis eines erneuten Zusammenfügens der Elemente Aufschlüsse über das Verhalten des Systems zu gewinnen. Man spricht in diesem Fall von einer Diskretisierung von Problemen. Die Methode der finiten Elemente ist damit ein allgemeines Diskretisierungsverfahren für Kontinuumsprobleme.

Die Definition der Methode der finiten Elemente lautet wie folgt:

- Das Kontinuum wird in eine endliche Anzahl von Teilen (Elementen) zerlegt, deren Verhalten durch eine endliche Anzahl von Parametern gekennzeichnet ist.
- Die Lösung für das Gesamtsystem als strukturelle Vereinigung seiner Elemente folgt genau den gleichen Regeln, wie sie auch für Probleme diskreten Charakters gelten.

In das System werden die Randbedingungen und Lasten eingearbeitet, und eine Lösung über ein numerisches Approximationsverfahren liefert abgeleitete Größen wie Spannungen, Verzerrungen und Reaktionskräfte.

2.1 Finite Elemente des elastischen Kontinuums - Verschiebungsansatz

In der konstruktiven Ingenieurstätigkeit sind häufig Spannungs- und Verzerrungsverläufe belasteter elastischer Kontinua zu ermitteln. Dieses Problem lässt sich durch folgende Näherung lösen:

1. Das Kontinuum wird durch gedachte Linien oder Flächen in eine Anzahl finiter Elemente zerlegt.
2. Dabei wird angenommen, dass die Elemente durch eine bestimmte Anzahl von Knotenpunkten, angeordnet an den Elementrändern, untereinander verbunden sind. Die Verschiebungen der Knotenpunkte werden als die grundlegenden unbekannten Größen des Problems aufgefasst.

2.1 Finite Elemente des elastischen Kontinuums

3. Der Verschiebungszustand innerhalb jedes finiten Elementes wird mit Hilfe eines Systems gewählter Funktionen in Abhängigkeit von den Knotenpunktverschiebungen eindeutig festgelegt.
4. Durch diese Verschiebungsfunktionen ist auch der Verzerrungszustand im Inneren eines Elementes eindeutig in Abhängigkeit von den Knotenverschiebungen bestimmt. Aus diesen Verzerrungen kann unter Beachtung eventuell vorhandener Anfangsverzerrungen mit dem Stoffgesetz des Materials die Spannungsverteilung im gesamten Element und damit auch an dessen Rändern ermittelt werden.
5. Es wird ein System von Knotenkräften bestimmt, das im Gleichgewicht mit den Oberflächen- und Volumenkräften steht und als 'Ersatzbelastung' fungiert. Das führt letztlich zu einer Beziehung der folgenden Form:

$$K \cdot a = f$$

Gleichungssystem bei linearen Problemen

In diesem Zusammenhang bedeutet:

K = Steifigkeitsmatrix

a = Knotenverschiebungen vektoriell (Knotenparameter)

f = Knotenkraft (vektorielle Kraft)

Wichtig ist, dass die Randbedingungen entsprechend eingearbeitet wurden, um eine Singularität der Matrix K bei der numerischen Integration zu vermeiden. Die Matrix K ist singulär, wenn die Anzahl der Unbekannten a größer ist als die Anzahl der an allen Integrationspunkten ersatzweise eingeführten unabhängigen Beziehungen.

Die verallgemeinerten Spannungs-Verzerrungs-Matrizen bei isotropem Material haben für unterschiedliche Problemfälle unterschiedliches Aussehen. In der unten angeführten Übersicht ist dies für die Problemstellungen des Stabes, des Balkens, des ebenen Spannungszustands, des ebenen Verzerrungszustands und des dreidimensionalen Körpers dargestellt:

2 Theoretische Grundlagen

Stab: E

Balken: $E \cdot I$

Ebener Spannungszustand:

$$\frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Materialeigenschafts-
matrix für unterschiedli-
che Problemstellungen

Ebener Verzerrungszustand:

$$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

Dreidimensionalität:

$$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & & & \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & & & \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & & & \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & & \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

Nicht eingetragene Elemente sind Null

2.2 Beispiel einer FEM-Berechnung

Dabei bedeutet:

E = Elastizitätsmodul

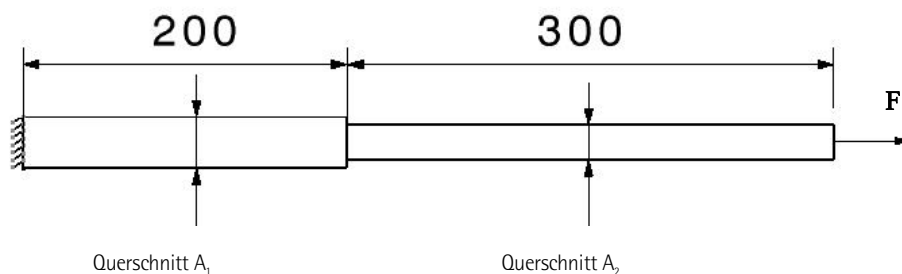
ν = Querkontraktionszahl

I = Flächenträgheitsmoment

Der erste Schritt in Berechnungen mit finiten Elementen ist daher die Entscheidung, welche Art von Problemstellung vorliegt bzw. angenommen werden soll. Im Anschluss daran wird die Steifigkeitsmatrix K aufgestellt.

2.2 Beispiel einer FEM-Berechnung

In diesem einfachen Beispiel soll die Methode der finiten Elemente gezeigt werden. Für das in untenstehender Abbildung dargestellte Stabtragwerk sind die Gleichgewichtsbedingungen für die finiten Elemente aufzustellen und die Verformungen sowie die Spannungen zu berechnen:



Übungsbeispiel, um den Algorithmus der finiten Elemente-Methode zu erklären

Folgende Werte sind gegeben:

Querschnittsfläche $A_1 = 900 \text{ mm}^2$

Querschnittsfläche $A_2 = 400 \text{ mm}^2$

Länge L_1 mit Querschnitt 1: $L_1 = 200 \text{ mm}$

Länge L_2 mit Querschnitt 2: $L_2 = 300 \text{ mm}$

Der Werkstoff des Trägers ist Stahl mit folgenden Kennwerten:

Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$

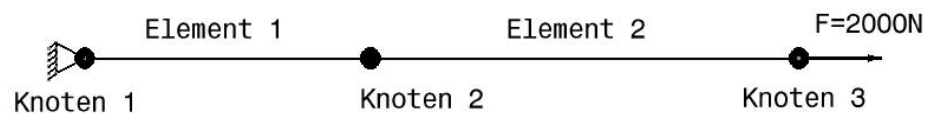
Querkontraktionszahl $\nu = 0.29$

2 Theoretische Grundlagen

Am linken Ende des Trägers liegt eine feste Einspannung vor und am rechten Ende wird der Träger durch eine axiale Last von 2000 N beansprucht.

Damit kann der gegebene Träger über zwei Stabelemente mit je zwei Knoten nachgebildet werden. Dies führt zu folgender Situation:

Schematische Nachbildung des Stabtragwerks mit Stabelementen



Man muss nun die Steifigkeitsmatrix für die beiden Elemente aufstellen. Dies ergibt folgenden Ansatz unter Berücksichtigung der Materialeigenschaftsmatrix $C = E$ für das Stabproblem:

$$K = E/200 * \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + E/300 * \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Steifigkeitsmatrix K errechnet sich damit wie folgt:

$$K = \begin{pmatrix} 945.000 & -945.000 & 0 \\ -945.000 & 1.225.000 & -280.000 \\ 0 & -280.000 & 280.000 \end{pmatrix}$$

2.2 Beispiel einer FEM-Berechnung

Die Berücksichtigung der Randbedingungen, womit die erste Zeile sowie die erste Spalte der Matrix gestrichen werden kann, ergibt folgende Gleichungen aufgrund von $K \cdot a = f$.

Der Verschiebungsvektor hat folgendes Aussehen:

$$a = (v_1 \ v_2 \ v_3)$$

Die vektorielle Kraft wird wie folgt angesetzt:

$$f = (f_1 \ f_2 \ f_3) = (0 \ 0 \ 2000)$$

Damit erhält man für die Verschiebungen v_1 und v_2 zwei Gleichungen:

$$1225000 \cdot v_2 - 280000 \cdot v_3 = 0$$

$$-280000 \cdot v_2 + 280000 \cdot v_3 = 2000$$

Damit errechnet sich:

$$V_1 = 0$$

$$V_2 = 0,002116 \text{ mm}$$

$$V_3 = 0,009259 \text{ mm}$$

Nun können die Dehnungen berechnet werden:

$$\varepsilon_1 = (v_2 - v_1)/L_1 = 0,00001058 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_2 = (v_3 - v_2)/L_2 = 0,00002381 \text{ mm}$$

Berechnung der
Spannungen und der
Verschiebungen

Die Spannungen ergeben sich daraus über:

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 \cdot E = 2,22 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = \varepsilon_2 \cdot E = 5 \text{ N/mm}^2$$

Dies ist stark vereinfacht ein Lösungsverfahren der Finite-Elemente-Methode.

2 Theoretische Grundlagen

Analytische Berechnung:

Eine Kontrolle dieser Ergebnisse über eine analytische Berechnung mit dem Zusammenhang:

$$\sigma = F / A$$

zeigt folgendes Ergebnis:

$$\sigma_1 = 2000/900 = 2,22 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = 2000/400 = 5 \text{ N/mm}^2$$

In der Praxis der FEM-Berechnung ist natürlich meist eine Vielzahl von Knoten vorhanden, die unter Berücksichtigung der entsprechenden Problemklasse zu einem komplexen Gleichungssystem führen, das nur von einem leistungsfähigen Rechner gelöst werden kann.

3 Arbeitsumgebung GPS

Die Produkte CATIA GPS (Generative Part Structural Analysis) und das in weiterer Folge behandelte GAS (Generative Assembly Structural Analysis) sind Plattform-P2-Produkte. Sie gehören zur Analysis and Simulation Solution.

P1, P2 und P3 charakterisieren bestimmte Plattformen. Damit kann CATIA V5 besser an die Anforderungen der Anwender angepasst werden. P2 ist die Standardplattform für prozessorientierte Aufgaben. Die Plattform P1 enthält die Grundfunktionen für kleinere sowie mittlere Unternehmen, während die Plattform P3 spezialisierte Funktionalitäten für Sonderbereiche großer Industrieunternehmen (Auto- und Flugzeugindustrie) enthält.

Das GPS-Modul unterstützt den Konstrukteur in seiner Ingenieurstätigkeit und bietet ihm die Möglichkeit der Berechnung von Bauteilen sowie Baugruppen hinsichtlich der auftretenden Spannungen sowie Verformungen.

Nicht unerwähnt bleiben soll, dass die Übersetzung der englischen Begriffe der Bedienungsoberfläche von CATIA V5R12 ins Deutsche nicht durchgängig und auch nicht immer aussagekräftig durchgeführt wurde. In diesem Buch werden aus diesem Grund häufig auch die englischen Bezeichnungen verwendet, oder eben schlecht übersetzte Bezeichnungen technisch richtig erläutert.

Das GPS-Modul umfasst in der Plattform P2 sowohl die Bereiche Generative Part Structural Analysis (Arbeitsumgebung zur Bauteilberechnung) als auch Generative Assembly Structural Analysis (Arbeitsumgebung zur Berechnung von Baugruppen).

Nach Abschluss der später beschriebenen vorbereitenden Arbeiten kann die Generative Structural Analysis Arbeitsumgebung auf mehrere Arten aufgerufen werden:

1. Über die Menüleiste: Start/Analyse & Simulation/ Generative Structural Analysis
2. Durch Anklicken des GPS-Icons im Willkommen-Dialog, in dem die häufig verwendeten Arbeitsbereich-Favoriten zusammengestellt werden können. Dies geschieht durch: Ansicht/Symbolleisten/Anpassen/Menü Start; hier können die Favoriten aus den angebotenen Arbeitsbereichen nach rechts verschoben und im 'Willkommen Fenster' angezeigt werden.

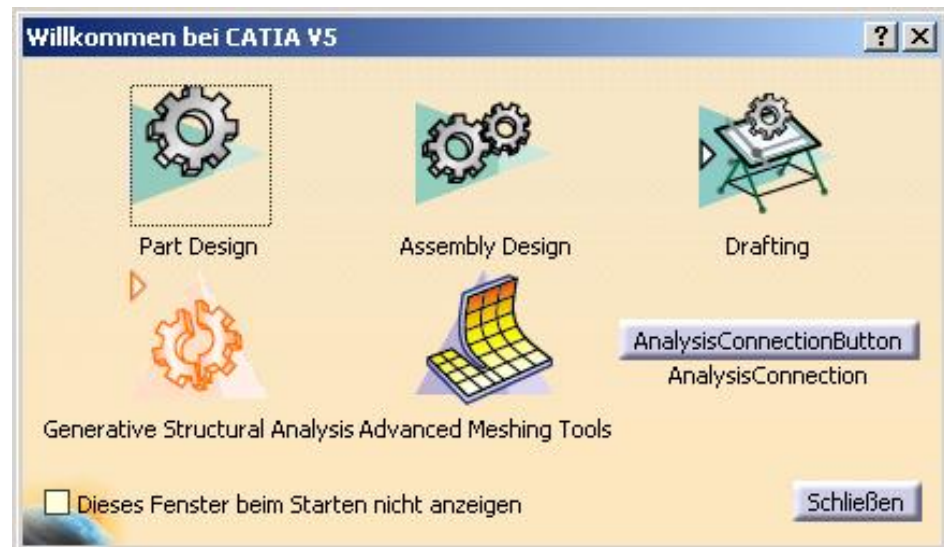
Der GPS-Arbeitsbereich



Starten der GPS-Arbeitsumgebung

3 Arbeitsumgebung GPS

Häufig verwendete
Arbeitsbereiche - Favi-
riten

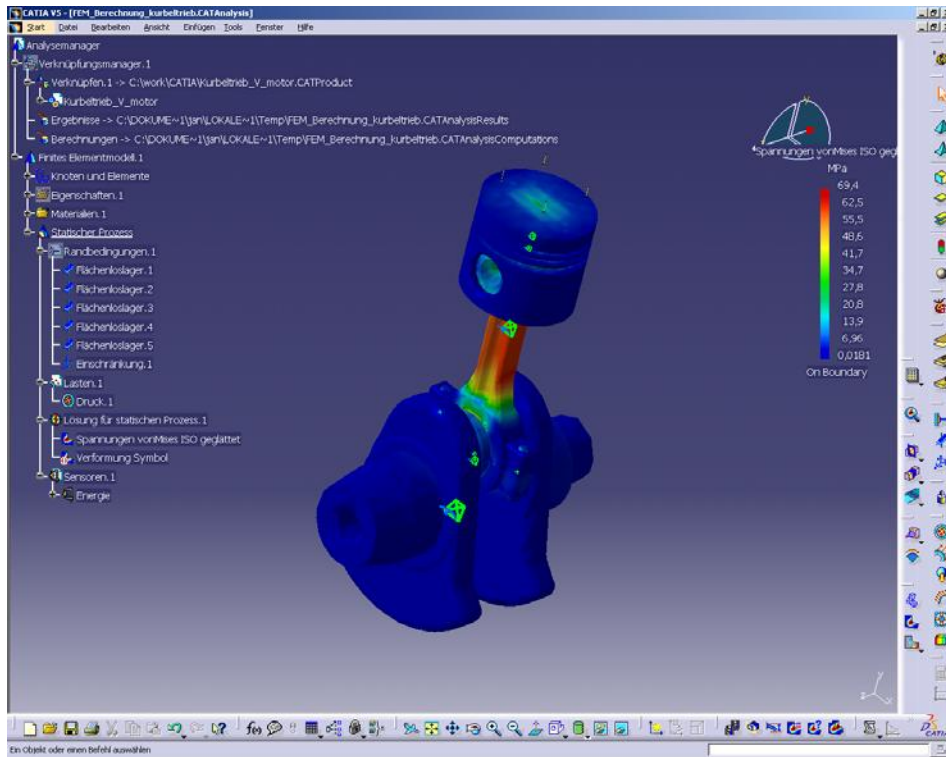


Benutzeroberfläche
User Interface

Die folgende Abbildung zeigt die Benutzeroberfläche der GPS-Umgebung in CATIA V5R12, wie sie sich dem Anwender präsentiert. Das User Interface ist im Handling vergleichbar mit dem der anderen V5-Arbeitsbereiche.

Eine Bauteilanalyse kann nicht zur Gänze im GPS-Modul durchgeführt werden, dazu sind vorbereitende Arbeiten in anderen Arbeitsumgebungen notwendig. Im folgenden Kapitel wird genauestens beschrieben, welche Schritte bis zum Starten der GPS-Umgebung durchzuführen sind, um nachfolgend eine Bauteilanalyse zu ermöglichen. Darüber hinaus ist die Konstruktionsgeometrie nicht die optimale Geometrie für die Berechnung. Die Berechnungsgeometrie sollte möglichst vereinfacht werden. Geometrien, die keinen Einfluss auf die Steifigkeit haben, sollten inaktiviert werden, Symmetrien sollten genutzt werden. Damit wird die Anzahl der Elemente reduziert und ein gleichmäßiges Netz erzielt.

3.2 Die Materialbibliothek



CATIA V5 GPS-
Arbeitsumgebung

3.1 Vorbereitung einer GPS-Analyse

Um eine FEM-Berechnung an einem Bauteil durchführen zu können, ist im Anschluss an die Konstruktion eine Definition der Materialeigenschaften erforderlich. Dies geschieht bereits in der Arbeitsumgebung Part Design beziehungsweise für Flächenkonstruktionen im Bereich Flächenerzeugung.

3.2 Die Materialbibliothek

Die Definition von Materialien erfolgt in der Arbeitsumgebung Material Library (Materialbibliothek). Diese wird wiederum entweder über die Menüleiste durch: Start /Infrastruktur/Material Library oder direkt aus den Favoriten über das abgebildete Icon gestartet. Standardmäßig sind bereits bestimmte Materialien in vordefinierten Materialfamilien angelegt. Eine für die FEM-Berechnung relevante Materialfamilie



3 Arbeitsumgebung GPS

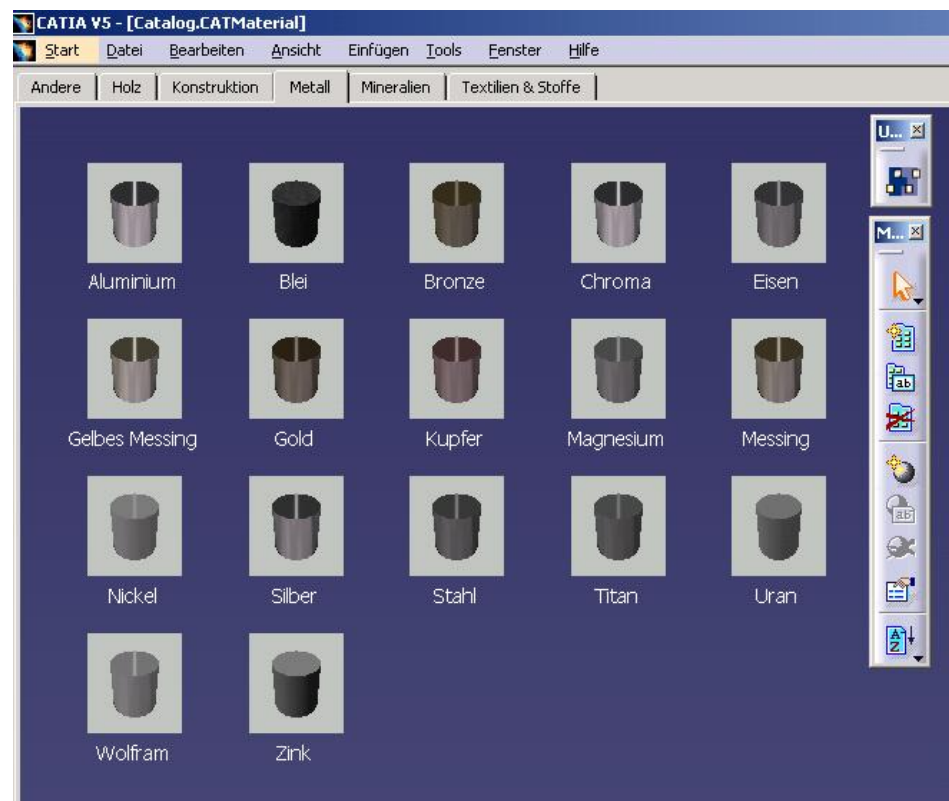
ist die der Metalle. Der Standardmaterialkatalog ist bei der Installation von CATIA bereits inkludiert.

Da in diesem Standardmaterialkatalog keine unterschiedlichen Stahlsorten und auch keine unterschiedlichen Gusswerkstoffe angelegt sind, empfiehlt es sich, für eine fundierte FEM-Berechnung die Materialbibliothek zu erweitern.

Dabei sollte folgende Vorgangsweise eingehalten werden:

- Es ist vorteilhaft, die bestehende Materialbibliothek zu kopieren und in ein neues Verzeichnis zu speichern. Dies ist deshalb sinnvoll, da bei der Installation einer neuen Release-Version von CATIA V5 die geänderte Materialbibliothek sonst überschrieben wird. Die Standardmaterialbibliothek findet man unter C:/Programme/Dassault Systemes/B12/intel_a/startup/materials/German/Catalog.
- Nach dem Kopieren des Standardkatalogs wird die Kopie mittels Doppelklick geöffnet.

Der Standardmaterialkatalog Catalog.CATMaterial und die Arbeitsumgebung Material Library



3.2 Die Materialbibliothek

Man befindet sich damit automatisch in der Arbeitsumgebung Material Library. Die wichtigsten Icons beim Anlegen einer neuen Materialfamilie bzw. eines neuen Materials werden nachstehend erklärt.

3.2.1 Anlegen einer neuen Materialfamilie

Mit diesem Icon kann eine neue Materialfamilie angelegt und in den Materialkatalog eingefügt werden. Im anschließenden Beispiel wird die Materialfamilie der Gusswerkstoffe in den Materialkatalog aufgenommen.

Neue Familie



3.2.2 Anlegen eines neuen Materials

Mit nebenstehendem Icon wird innerhalb der ausgewählten Materialfamilie ein neues Material angelegt, wobei schrittweise die Materialeigenschaften definiert werden. Von herausragender Bedeutung für die FEM-Berechnung ist die Materialeigenschaft 'Analyse'.

Neues Material



3.2.3 Sonstige Icons in der Material Library

In unten stehender Tabelle findet sich eine Übersicht sämtlicher in der Arbeitsumgebung Material Library befindlicher Icons mit einer Funktionsbeschreibung.

	Neue Materialfamilie erstellen		Materialfamilie umbenennen
	Materialfamilie entfernen		Neues Material erstellen
	Material umbenennen		Material(ien) entfernen
	Eigenschaften bearbeiten		Materialsortiermöglichkeiten
	Namen von A bis Z ordnen (aufsteigend)		Namen von Z bis A ordnen (absteigend)

Icons in der
Material Library

3.2.4 Übungsbeispiel Material Library

In diesem Übungsbeispiel wird gezeigt, wie innerhalb der Standardmaterialbibliothek eine neue Materialfamilie sowie innerhalb dieser Familie ein neues Material angelegt wird. Die Materialfamilie soll die Familie der Gusswerkstoffe sein, innerhalb derer der Grauguss EN-GJL-250 angelegt wird.

Starten Sie zuerst die kopierte Materialbibliothek, die Sie zuvor in ein neues Verzeichnis abgelegt haben. Im nächsten Schritt gehen Sie mit einem einfachen Mausklick der linken Maustaste (Selektion) auf das Icon für das Anlegen einer neuen Familie. Danach selektieren Sie das Icon 'Eigenschaften bearbeiten', womit folgendes Fenster aufgerufen wird.

3 Arbeitsumgebung GPS

Anlegen einer neuen
Materialfamilie



Im Feld für den Komponentennamen tragen Sie die Bezeichnung Gusswerkstoffe ein, womit die neue Materialfamilie definiert ist.

Im nächsten Schritt wird mit dem Icon 'Neues Material' ein neues Material angelegt. Sie erhalten innerhalb der Gusswerkstoffe folgendes Bild:

Anlegen eines neuen
Materials



Daraufhin markieren Sie dieses neue Material mit der linken Maustaste und rufen das Icon 'Eigenschaften bearbeiten' auf. Im daraufhin erscheinenden Fenster gehe ich auf die Karteien 'Komponenteneigenschaften' sowie vor allem auf die Analyse ausführlich ein, da diese Kartei die für die FEM-Berechnung unerlässlichen mechanischen Eigenschaften enthält. Sie sehen folgendes Fenster:

3.2 Die Materialbibliothek



Bestimmung des
Materialnamens

Beim Komponentennamen tragen Sie EN-GJL-250 ein, was der früher gebräuchlichen Bezeichnung GG-25 entspricht. Dann rufen Sie die Kartei 'Analyse' auf.



Definition der Material-
eigenschaften in der
Kartei 'Analyse'

Hier sind die entscheidenden Eingaben der mechanischen Eigenschaften des Materials zu treffen. Im ersten Feld haben Sie die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen isotropischem oder orthotropem Material. Im nächsten Feld findet sich der Elastizitätsmodul (*Young modulus*), der die wichtigste Größe für die Berechnung mit dem ELFINI Solver darstellt. Genauer dazu finden Sie im Kapitel über den von CATIA verwendeten ELFINI Solver.

Der Elastizitätsmodul E (Spannung σ / Dehnung ε) ist standardmäßig in der Einheit N/m^2 einzugeben. Es empfiehlt sich jedoch ein Umstellen der Einheit auf MPa (Megapascal), welche die gängige Einheit bei FEM-Analysen darstellt. Wie die Umstellung der Einheiten erfolgt, findet sich im Kapitel über die empfohlenen Standardeinstellungen für das GPS-Modul (3.5). Im darauf folgenden Feld ist der Poisson-

3 Arbeitsumgebung GPS

Faktor (Querkontraktionszahl), welcher das Verhältnis von Querdehnung zur Längsdehnung eines Werkstoffes darstellt, einzugeben. Daran anschließend findet sich die Dichte, die in der Einheit kg/m^3 anzugeben ist. Falls in der Analyse auch eine Temperaturbelastung errechnet werden soll, ist auch die Angabe der Wärmeausdehnung α (in der Einheit mm/mmK) notwendig. Das letzte Eingabefeld dieser Kartei, nämlich das Elastizitätslimit oder, besser gesagt, die Proportionalitätsgrenze des Werkstoffes, hat rein optionalen Charakter und dient dem Konstrukteur zum Vergleich mit den tatsächlich auftretenden Spannungen.

Die Kartei 'Wiedergabe' dient dazu, einen bestimmten Effekt (Rendering) für die Materialdarstellung zu erzeugen, und ist für die FEM-Berechnung nicht notwendig.

Auch die Kartei 'Vererbung' hat untergeordnete Bedeutung; hier wird lediglich festgelegt, welchen Elementen der Werkstoff zugeordnet werden soll. Dies ist dann von Bedeutung, wenn ein Teil (CATIA-Part) aus mehreren Körpern besteht, die in der Hierarchie des Strukturbaumes miteinander verbunden sind.

In der Kartei 'Zeichnung' sind jene Materialeigenschaften definiert, welche für die 2D-Zeichnungsableitung erforderlich sind, wie z.B. das Schraffurmuster. Eine Eingabe für das GPS-Modul ist nicht notwendig.

Schlussendlich können in der Datei 'Standards' diverse Standardeinstellungen für die Materialdefinition getroffen werden.

Nach Abwicklung dieser Schritte haben Sie ein neues Material in der zuvor definierten Materialfamilie der Gusswerkstoffe angelegt.

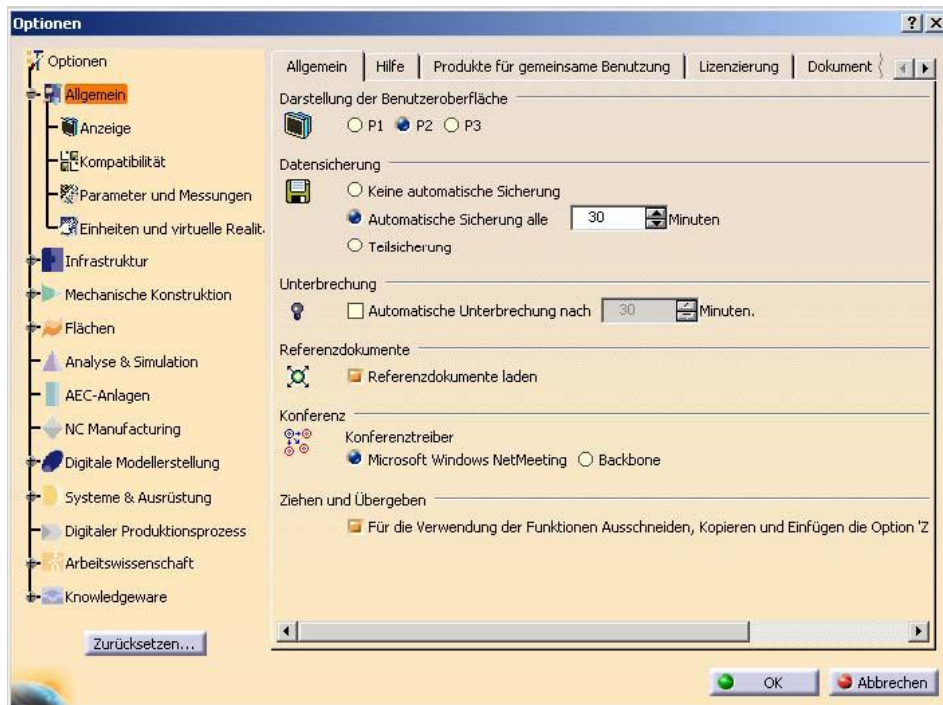
Angelegtes neues
Material
EN-GJL-250



3.2.5 Pfadeingabe für den neuen Materialkatalog

Nach dem Speichern des erweiterten neuen Materialkatalogs ist es notwendig, einen neuen Pfad zu hinterlegen, um diese Materialdatenbank standardmäßig für die Zuordnung von Materialien zu verwenden. Dies geschieht mit der am oberen Bildschirmrand befindlichen, modulunabhängigen Funktionsleiste über 'Tools' und anschließend 'Optionen'. Es erscheint ein Fenster mit folgendem Aussehen:

3.2 Die Materialbibliothek

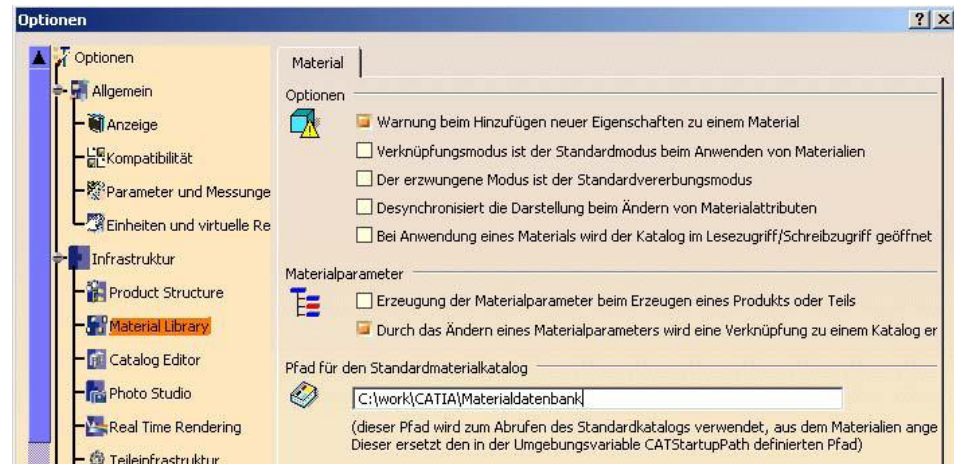


Aufruf der CATIA
Benutzereinstellungen

In der im linken Bildteil befindlichen Baumstruktur ist beim Eintrag 'Infrastruktur' der Baum weiter zu öffnen, worauf die Auswahl für die Einstellung 'Material Library' erscheint. Nach Selektion dieses Bereiches ist in der Zeile 'Pfad für den Standardkatalog' der Pfad in das Verzeichnis, in welches der erweiterte Materialkatalog abgelegt wurde, einzugeben. Im nachfolgenden Bild ist ein Beispiel für einen möglichen Pfad zur Materialdatenbank ersichtlich. Das Verzeichnis muss nicht zwingend in der gleichen Partition angelegt sein, in der CATIA installiert wurde. Wichtig ist jedoch, dass der Name der neuen Materialbibliothek wiederum mit 'Catalog.CATMaterial' abgespeichert wird, da sonst auf die Default-Materialdatenbank zurückgegriffen wird. Bei einer Release-Neuinstallation ist der Pfad wiederum neu einzugeben.

3 Arbeitsumgebung GPS

Anlegen des Pfades für die neue Materialdatenbank



Meist wird in Unternehmen auf eine zentral angelegte und gepflegte Materialdatenbank zugegriffen.

3.2.6 Materialzuordnung

Material zuordnen



Um eine FEM-Analyse durchführen zu können, muss in jedem Fall jedem Bauteil ein Material zugeordnet sein. Dies geschieht bereits in der jeweiligen Konstruktionsumgebung, in welcher der Bauteil gezeichnet wurde. Meist ist dies die Arbeitsumgebung 'Part Design' oder 'Wireframe and Surface Design'. Das dabei verwendete Icon heißt 'Material zuordnen' und befindet sich in der Funktionsleiste am unteren Bildschirmrand.

Nach Aufruf dieses Icons befindet man sich im Materialkatalog. Zunächst ist die gewünschte Materialfamilie auszuwählen und in dieser der gewünschte Werkstoff. Die Zuordnung zum Bauteil kann auf mehrere Arten erfolgen:

- Klick mit der rechten Maustaste auf das gewählte Material und im darauf erscheinenden Kontextmenü auf 'Kopieren', dann mit der rechten Maustaste im Strukturbaum auf den Bauteilnamen klicken, womit wiederum das Kontextmenü aufgerufen wird; hier 'Einfügen' wählen.
- Das gewünschte Material im Katalog mit der linken Taste selektieren, dann mit der linken Maustaste den Bauteilnamen im Strukturbaum wählen

3.2 Die Materialbibliothek



und anschließend im Fenster des Materialkatalogs das nun aktive Icon 'Material zuordnen'.



Materialzuordnung

- Über 'Drag and Drop' den Werkstoff in der Materialbibliothek selektieren, dabei die linke Maustaste gedrückt halten und das Material auf den Bauteilnamen im Strukturbaum ziehen.

Das Ergebnis sieht in jedem Fall gleich aus:



Ergebnis nach erfolgreicher Materialzuordnung

3 Arbeitsumgebung GPS

Im Strukturbaum wird zum Hauptkörper das entsprechende Material hinzugefügt. Die Vorgangsweise in der Arbeitsumgebung 'Wireframe and Surface Design' ist vollkommen analog zu der soeben beschriebenen. In der Arbeitsumgebung 'Assembly Design' können die Materialien auch gesamten Baugruppen zugeordnet werden. Es wird jedoch empfohlen, das Material für jeden Bauteil separat zu definieren, was vor allem eine nachträgliche Änderung vereinfacht.

3.3 Vorgangsweise bei der Berechnung

Bei der Durchführung einer Berechnung in der GPS-Umgebung ist generell folgende Vorgangsweise zu empfehlen:

Empfohlene Arbeitsschritte bei der Durchführung einer FEM-Analyse

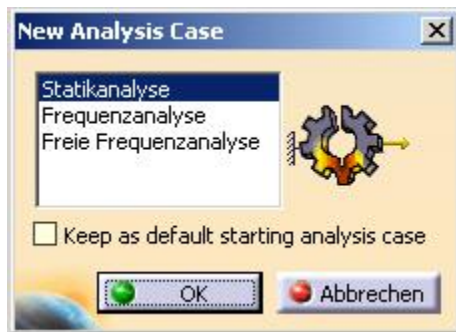
- Arbeitsumgebung Generative Structural Analysis starten
- Gewünschte Analyse 'Analysis Case' definieren
- Definition der Randbedingungen zur Bauteillagerung
- Definition der Belastung
- Durchführung der Berechnung
- Darstellung der Ergebnisse
- Auswertung der Ergebnisse (Plausibilitätsprüfung)
- Modifikation (Verfeinerung) der Vernetzung
- Neuerliche Berechnung
- Auswertung der Ergebnisse (quantitative Aussage)
- Bauteil im Konstruktionsprozess optimieren

Die angeführten Schritte werden in weiterer Folge detailliert beschrieben und anhand von Übungsbeispielen erklärt. Die Möglichkeiten zum Starten der Arbeitsumgebung wurden bereits am Beginn dieses Kapitels beschrieben, danach wird der Benutzer vom System aufgefordert, die gewünschte Analyse zu definieren.

3.3.1 Definition der gewünschten FEM-Analyse

Nach dem Starten der GPS-Arbeitsumgebung erscheint folgendes Auswahlfenster, das die Definition der durchzuführenden Berechnung erlaubt.

3.3 Vorgangsweise bei der Berechnung



Fenster zur Auswahl des gewünschten Analyseprozesses

Es sind grundsätzlich drei Analyseprozesse möglich:

3.3.1.1 Statikanalyse

Im Zuge einer statischen Analyse werden nach Definition der Randbedingungen die auftretenden Spannungen sowie Verformungen eines Bauteils bzw. einer Baugruppe berechnet.

3.3.1.2 Frequenzanalyse

Bei dieser Analyse werden die Eigenfrequenzen (Eigenformen) eines Bauteils unter Berücksichtigung der Randbedingungen errechnet.

3.3.1.3 Freie Frequenzanalyse

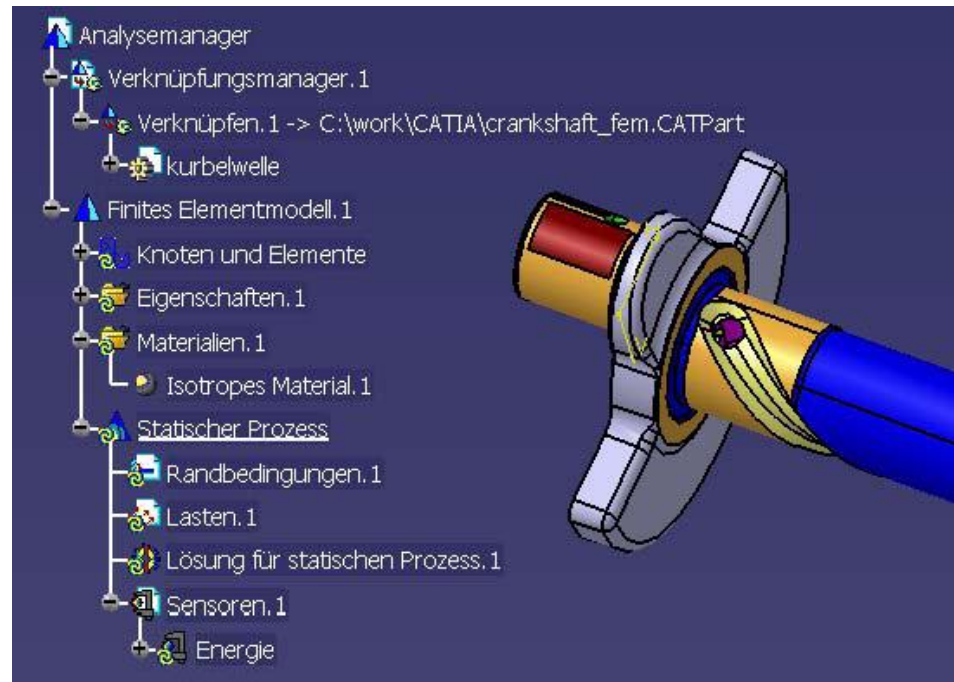
Bei der freien Frequenzanalyse werden ebenfalls die Eigenfrequenzen eines Bauteils ermittelt, jedoch ohne Berücksichtigung der Einspannbedingungen. Der Bauteil wird quasi als frei schwebend betrachtet.

Nach einer Auswahl des gewünschten Analyseprozesses erhält der Benutzer beispielhaft folgenden Strukturbaum in der FEM-Umgebung.

Der Verknüpfungsmanager gibt den Pfad der jeweiligen Verknüpfung mit dem Konstruktionsteil (CATPart) an. Falls auf diesen Teil nicht mehr zugegriffen werden kann, ist eine Berechnung nicht möglich.

3 Arbeitsumgebung GPS

Strukturbaum nach
Öffnen der GPS-
Arbeitsumgebung



Daran anschließend findet sich das finite Elementmodell, jener Teil des Strukturbaums, welcher alle Aktionen in der GPS-Arbeitsumgebung strukturiert dokumentiert.

3.4 Einstiegsbeispiel für GPS

Übungsbeispiel zum
schnellen Einstieg in
GPS

An dieser Stelle möchte ich ein einfaches Übungsbeispiel zum schnellen Kennenlernen der Arbeitsumgebung GPS ausführen, das den Benutzer mit dem Handling und der unter Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgangsweise bei einer Berechnung vertraut machen soll. Im Anschluss daran werden in den Kapiteln 4 bis 8 alle zur Verfügung stehenden Möglichkeiten von GPS genauer erklärt.

3.4.1 Aufgabenbeschreibung

In dieser Aufgabe soll eine FEM-Analyse der Kurbelwelle eines Kältekompressors durchgeführt werden. Dabei sollen die sich unter Belastung ergebenden Spannungen sowie Verformungen untersucht werden. Die Belastung ergibt sich aus dem Kompressionsvorgang, der zu einer Verdichtung des Kältegas auf 15 bar führt. Daraus ergibt sich eine auf den im Pleuel gleitgelagerten Kurbelzapfen wirkende

3.4 Einstiegsbeispiel für GPS

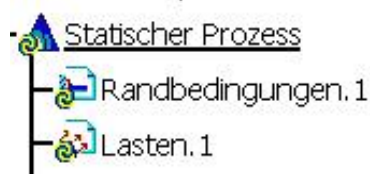
Lagerkraft von maximal 600N. Die Kurbelwelle wiederum ist im Zylindergehäuse gleitgelagert. Kritisch sind die auftretenden Spannungen in der oberen Totpunktstellung im Übergang von Kurbelzapfen zum Kurbelwellenschaft.

3.4.2 Öffnen des Startmodells

Beginnen Sie das Übungsbeispiel mit dem Öffnen der Datei '*Crankschaft_fem.CATPart*'. Sie sehen, dass bereits ein Material zugeordnet ist und damit einem Starten der Arbeitsumgebung GPS nichts im Wege steht.

3.4.3 Auswahl des Analyseprozesses

Als Nächstes wird der Analyseprozess definiert. Wählen Sie hier die Statikanalyse aus. Als Ergebnis erhalten Sie eine Darstellung wie in vorhergehender Abbildung. Im Strukturbaum sind beim Eintrag 'Statischer Prozess' sowohl bei den Randbedingungen als auch bei den Lasten noch Eingaben nötig. Dies ist aufgrund des dort befindlichen Wirbelwindes ersichtlich.



Eintrag des statischen Prozesses im Strukturbaum

Der Wirbelwind ist in der GPS-Umgebung stets das Zeichen für eine noch durchzuführende Aktion.

3.4.4 Randbedingungen zur Bauteillagerung

Nun müssen die Randbedingungen zur Bauteillagerung definiert werden. Die Kurbelwelle ist im unteren zylindrischen Teil des Schaftes im Rotor des Elektromotors eingepresst, was über eine feste Einspannung abgebildet wird.

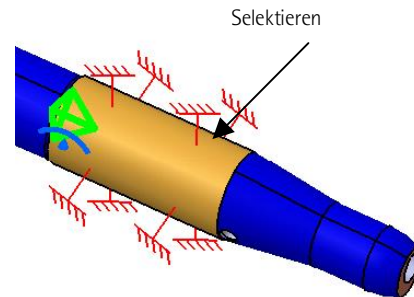


Feste Einspannung

Nach Auswahl des Icons für die feste Einspannung erscheint folgendes Fenster:

3 Arbeitsumgebung GPS

Definition der festen
Einspannung



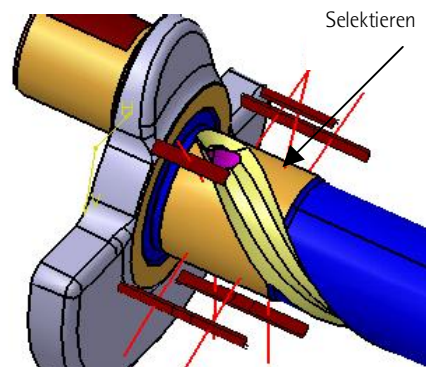
Im Feld 'Name' können Sie die Bezeichnung für die feste Einspannung eingeben, es kann jedoch auch der standardmäßig vergebene Name verwendet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und besseren Nachverfolgbarkeit empfiehlt es sich jedoch, einen entsprechenden Eintrag zu tätigen. In diesem Fall geben Sie 'Feste Einspannung im Rotor' ein. Das Feld 'Supports', was so viel wie Stützelement bedeutet, ist automatisch markiert und erfordert eine Auswahl. In diesem Beispiel selektieren Sie die hintere zylindrische Fläche der Kurbelwelle.

Die zweite Randbedingung der Kurbelwelle stellt die Lagerung im Gehäuse dar, die mit einem Gleitlager abzubilden ist. Selektieren Sie dazu das Icon 'Flächenloslager' in den am rechten Bildschirmrand befindlichen Funktionsleisten.



Sie erhalten ein weiteres Eingabefenster:

Definition des
Gleitlagers



Den Namen des Flächenloslagers wählen Sie mit 'Gleitlager Kurbelwelle'. Anschließend selektieren Sie die obere Zylindermantelfläche der Kurbelwelle. Damit ist die statische Lagerung der Kurbelwelle definiert.

3.4 Einstiegsbeispiel für GPS

3.4.4.1 Definition der Belastung

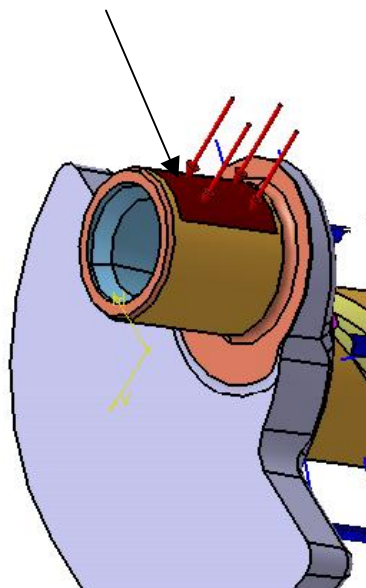
Nunmehr müssen Sie den Kurbelzapfen mit der entsprechenden Last beaufschlagen. Es handelt sich dabei um eine Lagerbelastung, die mit 600N in z-Richtung auf eine Teilmantelfläche des Kurbelzapfens wirkt. Diese Teilmantelfläche ist am Kurbelzapfen als dunkel eingefärbte Fläche erkennbar und gibt den in der Realität auftretenden Druckverlauf wieder. Selektieren Sie das Icon 'Verteilte Last' in der Symbolleiste 'Lasten':



Verteilte Last

Daraufhin erhalten Sie folgendes Eingabefenster:

Selektieren



Definition der Belastung des Kurbelzapfens

Im Eingabefenster vergeben Sie den Namen 'Lagerbelastung Kurbelzapfen' und selektieren die Teilmantelfläche des Kurbelzapfens. Bei 'Axis System'(Achsensystem)

3 Arbeitsumgebung GPS

behalten Sie die Einstellung 'Global', womit das Standardkoordinatensystem als aktuelles Koordinatensystem definiert wird. Bei den Einstellungen für den Kraftvektor geben Sie in Z-Richtung 600N ein. Im Feld 'Steerroutine' ist keine Eingabe notwendig.

3.4.4.2 Durchführung der Berechnung

Nachdem Sie die Randbedingungen und Lasten definiert haben, kann nunmehr die Berechnung gestartet werden. Wählen Sie dazu das Icon 'Berechnen' in der rechten Funktionsleiste.

Berechnen



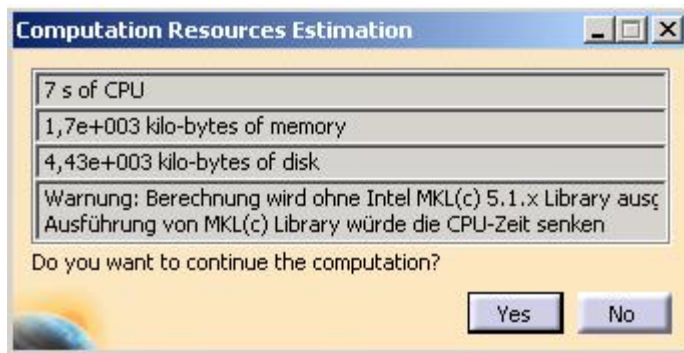
Damit erscheint ein weiteres Eingabefenster:

Auswahlfenster bei
der Durchführung
der Berechnung



Wählen Sie hier unter 'Compute' die Einstellung 'All' und markieren Sie 'Preview', womit Sie in weiterer Folge eine Abschätzung der erforderlichen Rechenzeit sowie des benötigten Speicherbedarfs erhalten. Dies ist insofern von Bedeutung, da die Rechenzeit bei komplexen FEM-Analysen durchaus im Bereich von Stunden liegen kann und der Speicherbedarf im Gigabyte-Bereich. Nach Bestätigung der Eingaben über die 'OK'-Taste beginnt die automatische Vernetzung mit linearen Tetraeder-Elementen (TE4). Nach erfolgreicher Vernetzung erhalten Sie ein weiteres Fenster mit der eben erwähnten Abschätzung von Zeit- und Speicherbedarf.

3.4 Einstiegsbeispiel für GPS



Abschätzung der
notwendigen
Ressourcen

Hierbei handelt es sich um eine reine CPU-Zeit, die nicht exakt mit der tatsächlich benötigten Zeit übereinstimmt. Weiters sieht man, dass die Berechnung ohne die INTEL MKL5.1 Library ausgeführt wird. Wie Sie diese Library verwenden können, findet sich im Kapitel 'Hinweise für den Anwender'. Durch Drücken der Taste 'Yes' wird die Steifigkeitsmatrix erstellt und in weiterer Folge das Gleichungssystem gelöst.

3.4.4.3 Darstellung der Ergebnisse

Nach erfolgreicher Berechnung kann eine Auswertung der Ergebnisse vorgenommen werden. Hierbei verwenden Sie vorrangig die Icons der Symbolleiste Bild.



Icon zur Darstellung des verformten Netzes

Icon zur Darstellung der VonMises-Spannung

Icon zur Darstellung der Verformung

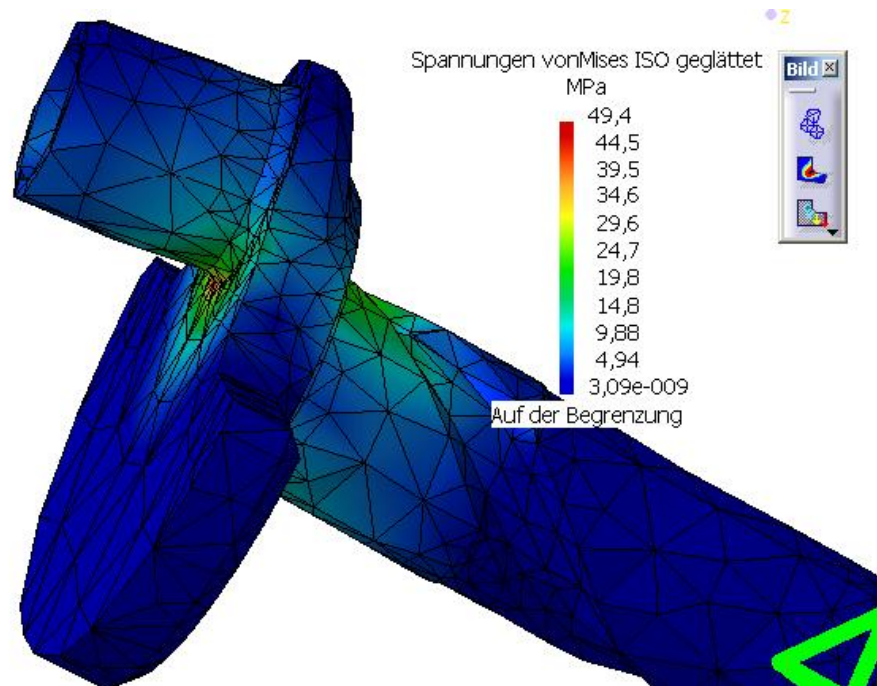
Beginnen Sie mit der Darstellung der VonMises-Vergleichsspannungen, wozu Sie den entsprechenden Befehl aufrufen.

3.4.4.4 Auswertung der Ergebnisse(Plausibilitätsprüfung)

Der Verlauf der auftretenden Spannungen ist in der folgenden Abbildung ersichtlich.

3 Arbeitsumgebung GPS

Spannungsverlauf bei
Berechnung mit
linearen Tetraeder-
Elementen (TE4)

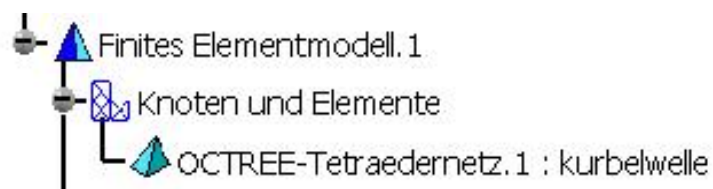


Im ersten Schritt ist es notwendig, eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse durchzuführen. Die auftretenden Spannungen sind in diesem Fall nur qualitativ zu bewerten. Unter der aufgetragenen Lagerlast sind der Verlauf der Spannungen sowie die entstehende Verformung durchaus plausibel, das heißt die Randbedingungen entsprechen in ausreichender Genauigkeit der Realität.

3.4.4.5 Modifikation (Verfeinerung) der Vernetzung

Nun ist eine Verfeinerung der Vernetzung sinnvoll, um auch eine quantitative Aussage über den Spannungsverlauf sowie die Verformungen tätigen zu können. Dies geschieht am einfachsten über den Strukturbaum durch Doppelklick auf den Eintrag 'OCTREE-Tetraedernetz:Kurbelwelle'.

Doppelklick auf
OCTREE-
Tetraedernetz



3.4 Einstiegsbeispiel für GPS

Damit erhält man folgende Einstellungsmöglichkeiten:



Modifikation des
Tetraedernetzes

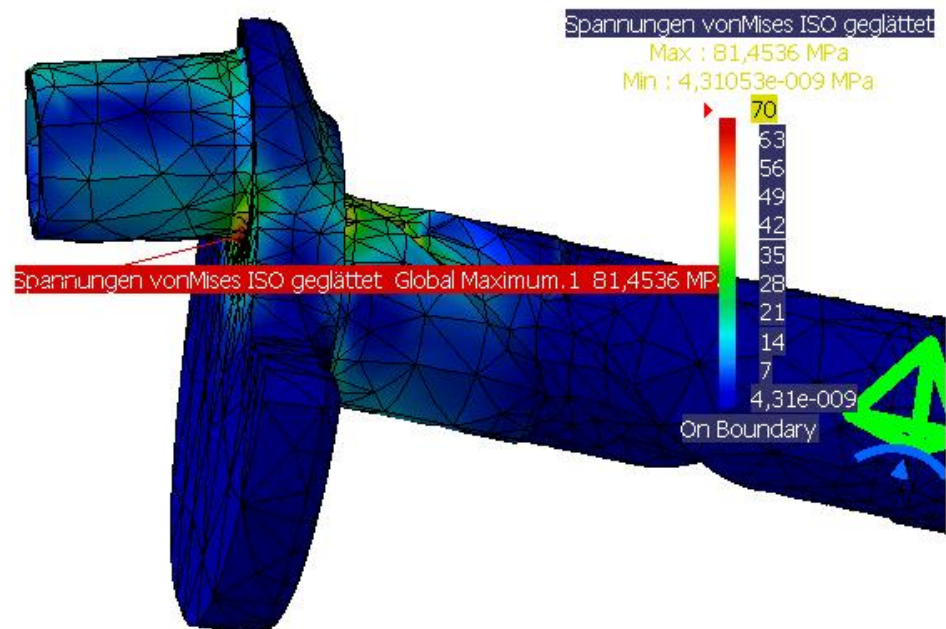
Stellen Sie den 'Absoluten Durchhang' beziehungsweise die Sekantenabweichung auf 1 mm und ändern Sie den Elementtyp auf das parabolische Tetraederelement (TE10). Das parabolische Tetraederelement TE10 besitzt anstatt 4 Knoten nunmehr 10 Knoten je Element und liefert daher ein wesentlich genaueres Rechenergebnis. Natürlich steigt dadurch auch der Ressourcenbedarf enorm.

3.4.4.6 Neuerliche Berechnung und Auswertung

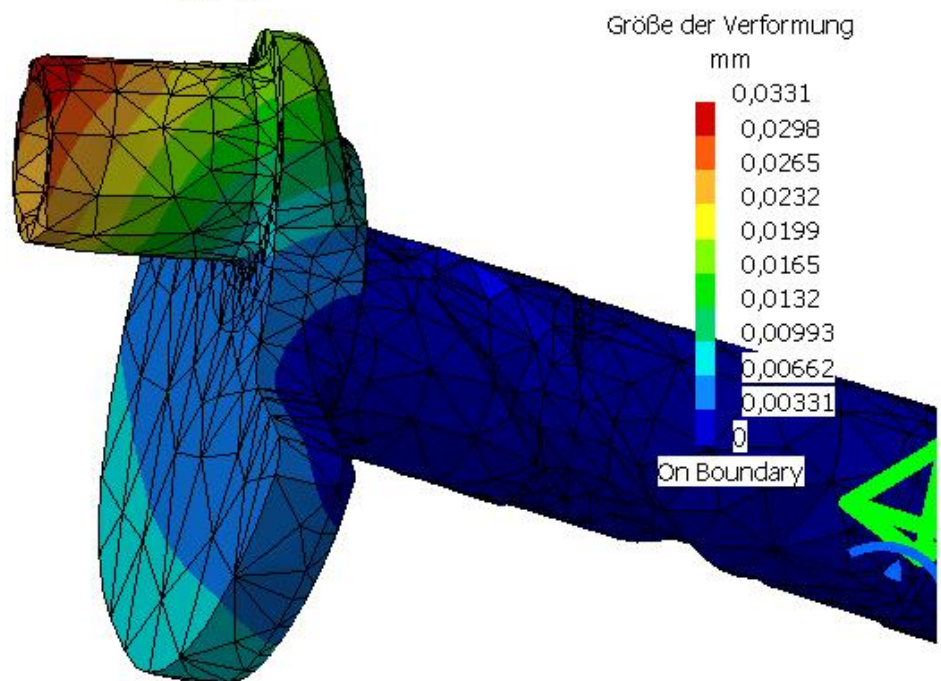
Infolge der zuvor beschriebenen Änderungen ist eine Neuberechnung notwendig, die wiederum durch Selektion des Icons 'Berechnen' gestartet wird. Beachten Sie, dass die notwendige Rechenzeit jetzt bereits im Minutenbereich liegt. Der Aufruf der VonMises-Vergleichsspannungen ergibt den in Abbildung 4 dargestellten Verlauf. Jetzt ist auch eine quantitative Aussage über den Spannungsverlauf möglich und man sieht, dass die höchste auftretende Spannung im Radius des Kurbelzapfens liegt und 81 N/mm^2 beträgt. In Abbildung 5 ist auch der Verlauf der Verformungen dargestellt, den Sie nach Selektion des Icons 'Abweichung' erhalten. Dabei sieht man, dass der Kurbelzapfen in Z-Richtung um einen Wert von maximal $33 \mu\text{m}$ abweicht. Da Gusswerkstoffe gegenüber Zugspannungen empfindlicher sind als gegenüber Druckspannungen, ist es wichtig, auch die Hauptspannungen zu analysieren.

3 Arbeitsumgebung GPS

VonMises Vergleichs-
spannungen bei Berech-
nung mit parabolischen
Tetraeder-Elementen



Größe der Verformun-
gen bei Berechnung
mit parabolischen
Tetraeder-Elementen



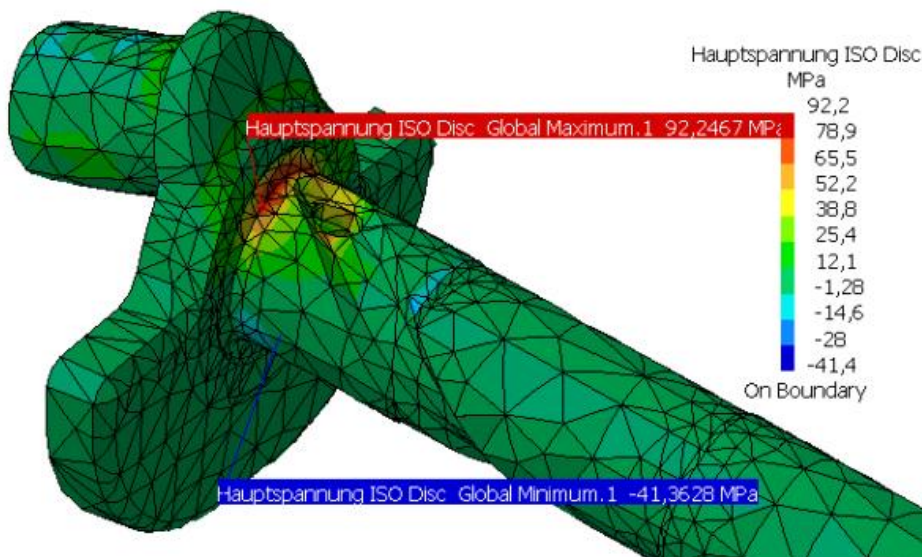
3.4 Einstiegsbeispiel für GPS

Die Hauptspannungen können über das Pulldown-Menü des Icons 'Abweichung' aufgerufen werden.



Icon für die Hauptspannungen

Die genauen Einstellungen, die notwendig sind, damit Sie die Hauptnormalspannungen (vorherrschende Zugbeanspruchung) erhalten, sind im Kapitel 8 'Auswertung der Ergebnisse' exakt beschrieben. Sie erhalten damit den in der Abbildung dargestellten Spannungsverlauf.



Hauptnormalspannungen bei Berechnung mit parabolischen Tetraeder-Elementen

Es ist eindeutig ersichtlich, dass die auftretenden Zugspannungen im Bereich des Freistichs der Kurbelwange Werte von 92 N/mm^2 erreichen, was vor allem an der erhöhten Kerbwirkung dieses Freistichs liegt. Die Hauptspannungen sind somit auch größer als die VonMises-Vergleichsspannungen, was man in der Praxis recht häufig sieht. Diese Zugspannungen sind die kritischsten Spannungen für den vorliegenden Gusswerkstoff und experimentelle Versuche haben gezeigt, dass bei höheren Kompressionsdrücken die Kurbelwelle genau an dieser gefährdeten Stelle bricht.

3 Arbeitsumgebung GPS

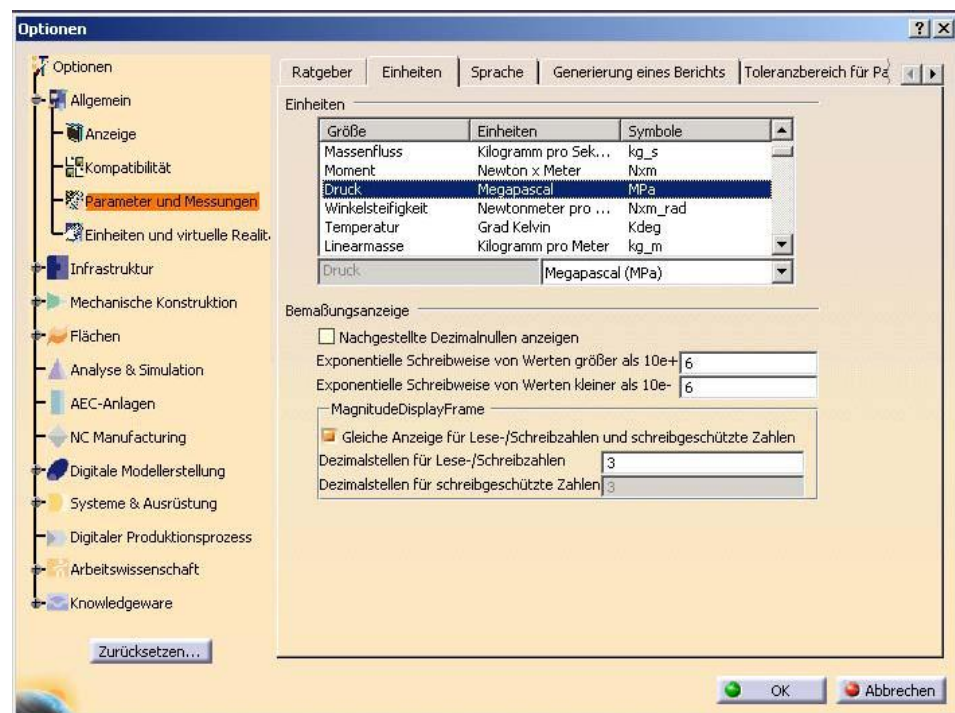
3.5 Standardeinstellungen für GPS

In diesem Kapitel werden die empfohlenen Standardeinstellungen für das Arbeiten mit dem GPS-Modul beschrieben.

3.5.1 Spannungen in der Einheit MPa

Wie bereits früher erwähnt, empfiehlt es sich, für FEM-Analysen die ausgewiesene Einheit von der CATIA-Default-Einheit, nämlich N/m^2 , auf MPa (entspricht N/mm^2) umzustellen. Dies geschieht wiederum über den schon bekannten Befehl 'Tools' und anschließend 'Optionen', worauf man folgendes Fenster erhält:

Auswahl der
Einheit MPa für
Spannungen

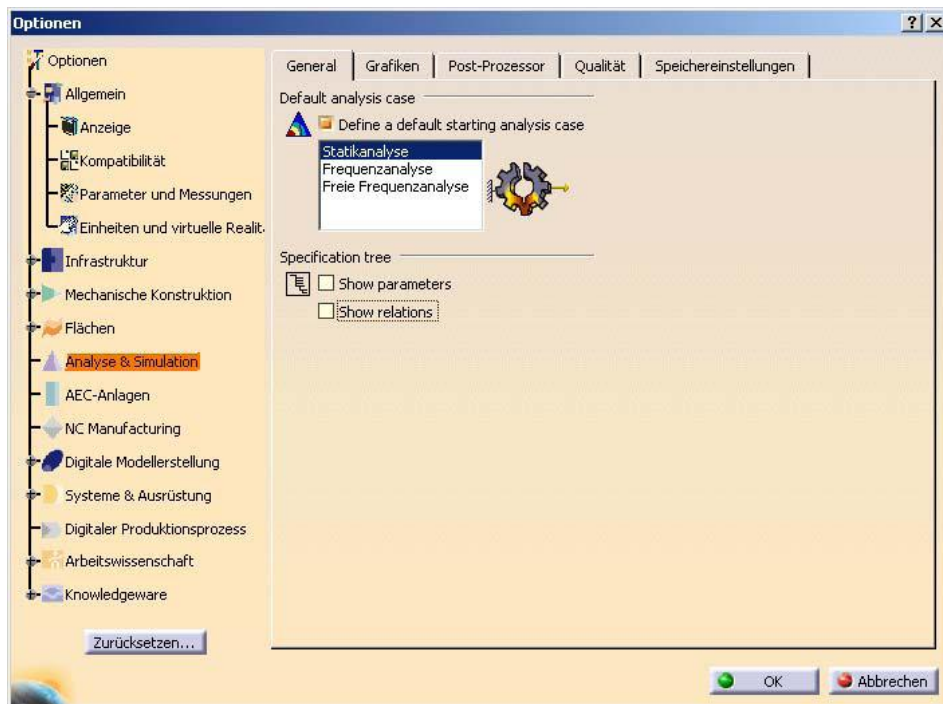


Links im Baum öffnet man den Punkt 'Allgemein' und dann 'Parameter und Messungen'. Dort wählt man die Kartei 'Einheiten' und sucht aus der Liste der Größen den Druck. Nach dieser Selektion kann man im Pulldown-Menü aus der Liste der Möglichkeiten die Einstellung MPa wählen. Nach Bestätigung über 'OK' wird dies die Standardeinheit für den Druck sowie für die Spannungen.

3.5 Standardeinstellungen für GPS

3.5.2 Generelle Standardeinstellungen von GPS

Im Menü 'Tools-Optionen' wird die Kategorie 'Analyse & Simulation' gewählt.



Standardeinstellungen für Analyse und Simulation

Hier kann in der Kartei 'General' eine gewünschte Standard-Startanalyse definiert werden, und weiters kann die Darstellung von Parametern und Beziehungen im Strukturbaum veranlasst werden.

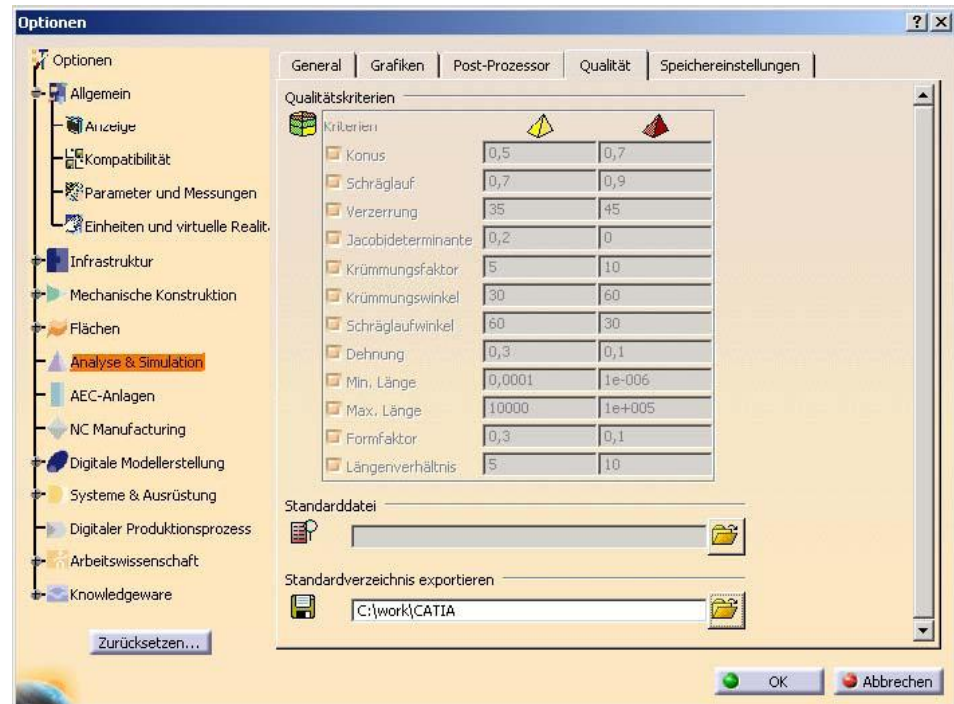
In der Kartei 'Grafik' kann die Art der Wiedergabe von Knoten der FEM-Elemente in Aussehen und Farbe geändert werden.

In der Kartei 'Post-Prozessor' lässt sich definieren, wohin die Images einer Post-Prozessor-Bearbeitung gespeichert werden.

Bei den Einstellungen für 'Qualität' ist es dem Benutzer möglich, eine eigene Datei mit Qualitätskriterien für gut und schlecht gewertete Elemente anzulegen.

3 Arbeitsumgebung GPS

Qualitätskriterien für
FEM- Elemente



Im Feld für 'Standardverzeichnis exportieren' ist der Pfad für die neu angelegte Datei einzugeben. Das Anlegen einer solchen Datei ist jedoch nur für sehr erfahrene FEM-User empfehlenswert, da sonst die Brauchbarkeit der Ergebnisse leidet.

In der Kartei 'Speichereinstellungen' geht es darum, zu definieren, wohin die Hypermatrix (Steifigkeitsmatrix) sowie die Lösung dieses Gleichungssystems gespeichert wird. Da damit ein nicht unerheblicher Speicherbedarf verbunden ist, sollte ein Verzeichnis gewählt werden, in dem genügend Platz vorhanden ist, weil ansonsten die Berechnung nicht zu Ende geführt werden kann. Im Unterschied zum FEM-Modul in CATIA V4 werden in der V5 im CATAnalysis-File nur die Randbedingungen und Lasten gespeichert, nicht aber die Matrix und deren Lösung. Dadurch wird nunmehr der Speicherbedarf für FEM-Dateien nicht zu groß, was aber zur Folge hat, dass bei kopierten CATAnalysis-Dateien eine erneute Berechnung erfolgen muss.

3.5 Standardeinstellungen für GPS

3.5.3 Festlegen der Speichereinstellungen

Am einfachsten kann eine Festlegung der Speichereinstellungen mit den Icons der Funktionsleiste 'Server-Tools' erfolgen.

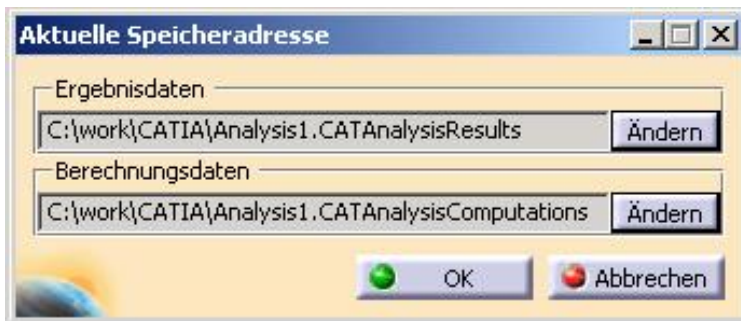


Speicheradresse für Matrix und Lösung festlegen

Speicherinhalt löschen

Pfad für temporäres Datenverzeichnis

Bei der Festlegung der Speicheradresse ist folgendermaßen vorzugehen. Nach Aufruf des Icons 'Speicheradresse' geben Sie die Pfade für die Hypermatrix sowie deren Lösung in den dafür vorgesehenen Zeilen ein.



Festlegen der Speicheradressen für Berechnungsdaten und Ergebnisdaten

Mit dem Icon 'Speicherinhalt löschen' werden die in der vorigen Einstellung ausgewählten Verzeichnisse zur Gänze gelöscht. Damit ist für eine neuerliche Auswertung wiederum eine Berechnung notwendig. Jedoch sollten nicht mehr benötigte Berechnungs- sowie Ergebnisdaten bei knappem Speicherplatz in regelmäßigen Abständen gelöscht werden.

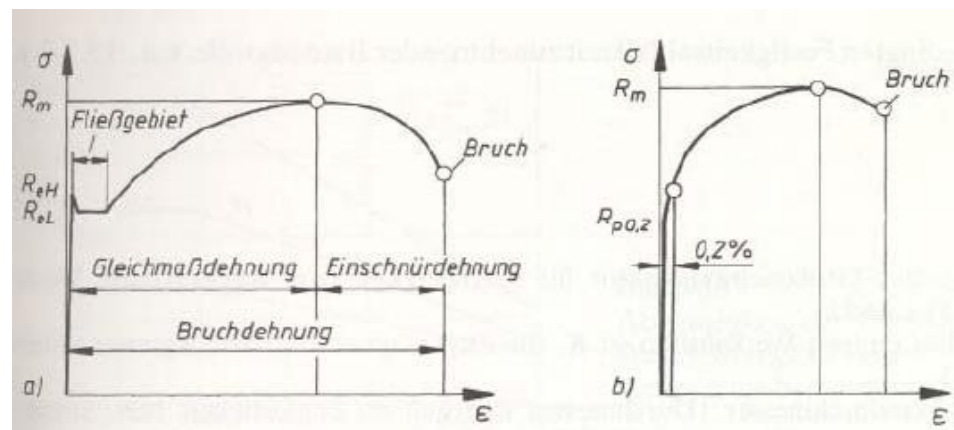
Mit dem Icon 'Temporäres Datenverzeichnis' wird angegeben, in welches Verzeichnis temporäre Daten gespeichert werden sollen.

3 Arbeitsumgebung GPS

3.6 Der CATIA ELFINI Solver

Der von CATIA verwendete ELFINI-Solver legt der Berechnung ein linear-elastisches Werkstoffverhalten zugrunde. Das bedeutet genau genommen, dass auch nach Überschreiten der Streckgrenze der Solver weiterhin nach der Steigung des Elastizitätsmoduls rechnet, ohne den in der Realität auftretenden Fließbereich zu berücksichtigen. Er folgt damit nicht dem Spannungs-Dehnungsverhalten der technischen Werkstoffe. Dies kann dazu führen, dass in der Analyse Spannungen ausgewiesen werden, die in der Realität bei diesem Werkstoff schon zum Bruch geführt hätten. Die unten stehende Abbildung veranschaulicht das Rechenverhalten des ELFINI-Solvers.

Spannungs-Dehnungsdiagramme für Stähle mit ausgeprägter Streckgrenze bzw. nicht ausgeprägter Fließgrenze



Es ist daher notwendig, die bei der FEM-Analyse erhaltenen Spannungen jeweils mit der Streckgrenze R_e des verwendeten Werkstoffs zu vergleichen. Falls die ausgewiesenen Spannungen die Streckgrenze überschreiten, liegt man bereits im plastischen Bereich, und es sollte in diesem Fall mit einem entsprechenden Solver gerechnet werden. Die von CATIA vorgesehenen Schnittstellen zu anderen Solvern werden im Kapitel 'Hinweise für den Anwender' beschrieben. Bei Werkstoffen ohne eine ausgeprägte Streckgrenze sollte die Dehngrenze $R_{p0,1}$ bzw. $R_{p0,2}$ als Vergleichsgröße herangezogen werden. Diese Ersatzstreckgrenze ist jene Spannung, bei der der Werkstoff nach völliger Spannungsentlastung eine bleibende Verformung von 0,1mm bzw. 0,2mm aufweist. Die Streckgrenze bzw. die Dehngrenze findet sich in diversen Werkstofftabellen, und sie kann als Vergleichswert in den Analyseigenschaften des jeweiligen Materials angegeben werden. Für die Auswertung der Ergebnisse kann dieser Wert numerisch angezeigt werden. Es liegt natürlich im Erfah-

3.7 Möglichkeiten der Vernetzung

rungsbereich des Ingenieurs, abzuschätzen, welche Spannungen für den jeweils verwendeten Werkstoff als kritisch anzusehen sind.

Eine Berechnung von dynamisch beanspruchten Bauteilen ist mit dem ELFINI-Solver möglich. So können vollständig dynamische Berechnungen für transiente als auch harmonische Anregungen durchgeführt werden.

Änderungen in der Lastrichtung als auch der Steifigkeit der Struktur werden aufgrund der geometrisch linearen Analyse nicht berechnet.

In der praktischen Arbeit mit dem GPS-Modul von CATIA hat sich für mich erwiesen, dass die mit dem ELFINI-Solver erzielten Ergebnisse sehr gut mit der Realität übereinstimmen. Eine entsprechend genaue Abbildung der Randbedingungen wird dabei natürlich vorausgesetzt. Die Abweichungen bei Berechnung mit parabolischen Elementen liegen lediglich bei $\pm 5\%$ und sind somit vergleichbar mit anderen FEM-Solvern wie NASTRAN, ANSYS, ABAQUS und I-DEAS.

3.7 Möglichkeiten der Vernetzung

Generell kann in CATIA-FEM mit 1D-, 2D- und 3D-Elementen vernetzt werden. Die Vernetzung erfolgt jeweils automatisch, der Benutzer hat jedoch die Möglichkeit, das Netz nachträglich zu bearbeiten. Welches Element für welche Berechnung zum Einsatz kommt, liegt im Ermessen des Users. Einige Richtlinien dafür sind in den folgenden Kapiteln erwähnt. Abschließend ist eine Übersicht über die angebotenen Elemente aufgeführt.

3.7.1 Beam-Elemente (1D-Elemente)

Beam-Elemente werden auf Drahtgittergeometrien angewendet und eignen sich am besten zur Berechnung von Fachwerken. Es ist die Eingabe einer Vielzahl von vordefinierten Querschnitten wie Rechteck, Kreis, U-Profil, I-Profil, L-Profil möglich. Darüber hinaus hat der Benutzer die Möglichkeit, seinen gewünschten Querschnitt selbst zu definieren.

3.7.2 Schalen Elemente (2D-Elemente)

Schalenelemente werden stets bei dünnwandigen Bauteilen zur Vernetzung herangezogen. Bei dünnwandigen Bauteilen (z.B. Blechteile) kommt es aufgrund der geringen Wandstärke zu starken Verzerrungen bei Verwendung von Volumenelementen, was wiederum zu einer ungewünschten Steifigkeitserhöhung der Struktur führt. Schalenelemente können unterteilt werden in Dreiecks- und Rechteckselemente, wobei bei beiden Arten lineare und parabolische Elemente definiert werden können.

3 Arbeitsumgebung GPS

3.7.3 Tetraeder-Elemente (3D-Elemente)

Die am häufigsten verwendeten Elemente in FEM-Berechnungen sind mit Sicherheit die Tetraeder-Elemente. Sie eignen sich sehr gut zur automatischen Vernetzung von Volumenkörpern. Es kann auch hier zwischen den linearen Tetraeder-Elementen (TE4) und den parabolischen Tetraeder-Elementen (TE10) unterschieden werden.

4 Definition der Randbedingungen

In diesem Abschnitt werden die Möglichkeiten zur Definition der Randbedingungen zur Bauteillagerung beschrieben. In untenstehender Abbildung findet sich eine Übersicht der dazugehörigen Icons mit der englischen Bezeichnung sowie deren Verfügbarkeit in den erhältlichen CATIA-FEM Produkten.

Restraints		GP1	GPS	EST	GAS	GDY
	Clamps					
	Surface Sliders					
	Ball Joints					
	Sliders					
	Pivots					
	Sliding Pivots					
	Advanced Restraints					
	Iso-static Restraints					

Mögliche Randbedingungen und deren Verfügbarkeit in den einzelnen FEM-Produkten

Virtual Parts		GP1	GPS	EST	GAS	GDY
	Rigid Virtual Parts					
	Smooth Virtual Parts					
	Contact Virtual Parts					
	Rigid Spring Virtual Parts					
	Spring Smooth Virtual Parts					
	Periodicity Conditions					

4 Definition der Randbedingungen

Das Produkt GP1 ist eine reduzierte Version von GPS in der Plattform P1. Das Produkt EST (ELFINI Structural Analysis) ermöglicht vor- und nachgezogene Prozesse (erweiterte Funktionalitäten im Bereich der Definition der Randbedingungen und der Lasten) sowie Lösungen mit zusätzlichen Analyseoptionen und ist in der Plattform P2 verfügbar. Die Umgebung GAS (Generative Assembly Structural Analysis) ermöglicht die Berechnung von Baugruppen, und GDY (Generative Dynamic Response Analysis) die Miteinbeziehung von dynamischen Vorgängen. Die deutschen Bezeichnungen für die jeweils verwendeten Icons finden sich nachfolgend in der Beschreibung der einzelnen Befehle.

Ein sehr wichtiger Schritt bei der Durchführung einer FEM-Analyse ist die korrekte Definition der Randbedingungen zur Bauteillagerung. Je näher die auftretenden Spannungen in der unmittelbaren Umgebung einer Randbedingung liegen, desto wichtiger ist eine realitätskonforme Abbildung der Lagerung. Die mechanisch richtige Auswahl der Lagerung beeinflusst somit nachhaltig die Aussagekraft der Analyse. Das Ziel der Randbedingungen ist es, die mechanischen sowie die kinematischen Eigenschaften der zu analysierenden Situation möglichst genau nachzubilden.

Die Bauteile müssen für eine FEM-Analyse in jedem Fall statisch bestimmt gelagert sein, das heißt, etwaige Starrkörperverschiebungen dürfen nicht mehr auftreten. Eine statische Überbestimmung in der Definition der Randbedingungen ist jedoch möglich. Sollte eine statische Unterbestimmung vorliegen, führt dies zu einer Fehlermeldung seitens des Solvers in folgender Form:

- Globale Singularität festgestellt
- Relative Pivot is too small
- Different Gradient Solution

Es ist für den Benutzer dann möglich, durch eine Netzdarstellung die noch zulässige Bewegung des Bauteils zu animieren, womit der verbliebene Freiheitsgrad einfach fixiert werden kann. Genauer dazu finden Sie in den Berechnungsbeispielen.

4.1 Bedingungen direkt auf Bauteilgeometrie

Folgende Icons definieren Einspannbedingungen, die direkt auf die Bauteilgeometrie angewendet werden können. Sie befinden sich in der Funktionsleiste 'Einschränkung'.

4.1 Bedingungen direkt auf Bauteilgeometrie



Feste Einspannung



Flächenloslager (Gleitlager)



Erweiterte Bedingung (allgemeine Definition)



Isostatische Randbedingung (Frequenzanalysen)

4.1.1 Feste Einspannung

Mit der Anwendung einer festen Einspannung werden alle translatorischen sowie alle rotatorischen Freiheitsgrade gesperrt. Damit kann sich die gewählte Geometrie weder bewegen noch verformen. Folgende Geometrien können selektiert werden:

Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid or Surface)	Groups		
						virtual part	

Selektierbare Geometrien

Auswählbare Geometrien sind Punkte, Kurven, Kanten, Flächen, Gruppen und virtuelle Teile.



Nach dem Aufruf des Icons 'Feste Einspannung' erscheint folgendes Eingabefenster:

4 Definition der Randbedingungen

Eingabefenster für
feste Einspannung






Im Eingabefeld 'Name' sollte eine entsprechende Bezeichnung eingegeben werden, ansonsten vergibt das System eine aufsteigende Nummerierung. Bei 'Supports' ist ein entsprechendes Geometrieelement gemäß der oben angeführten Tabelle zu wählen.

Ein häufiger Anwendungsfall für eine feste Einspannung ist eine starre Fixierung des Bauteils, wie sie beispielsweise beim Schweißen oder Kleben auftritt.

4.1.2 Flächenloslager

Dabei kann es sich um ebenes Gleiten oder rotatorisches Gleiten handeln. Bei der Selektion einer ebenen Fläche entsteht ein ebenes Gleitlager, bei Selektion einer Mantelfläche wird ein rotatorisches Gleitlager erzeugt. Eine Übersicht über die selektierbare Geometrie ergibt:

Selektierbare
Geometrien

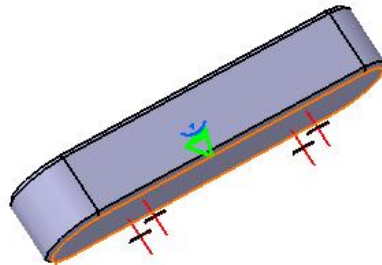
Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid / Surface)	Group		
							

In diesem Fall können Flächen und Gruppen selektiert werden. Je nachdem, ob es sich um ebene Flächen oder um Rotationsflächen handelt, können beim Flächenloslager zwei Ausprägungsformen unterschieden werden.

4.1.2.1 Ebenes Gleitlager

Nach Selektion des Icons 'Flächenloslager' erscheint folgendes Eingabefenster, in dem die weiteren Definitionen getroffen werden können:

4.1 Bedingungen direkt auf Bauteilgeometrie



Definition eines ebenen
Gleitlagers

Es sollte wiederum ein entsprechender Name vergeben werden. Dann wählt man eine ebene Fläche, in der das Gleiten auftreten kann. In der Richtung normal auf die gewählte Fläche kann damit Kraft übertragen werden.

Häufig verwendete Beispiele für ebene Gleitlager sind:

- Symmetriebedingungen
- Ebenes Gleiten Passfeder
- Drehgelenk
- Gleiten entlang einer Freiformfläche
- Seitliche Abstützung (Flächenkontakt) von Bauteilen
- Definition von kinematischen Relationen

4.1.2.2 Rotatorische Gleitlager

Ein rotatorisches Gleitlager entsteht bei der Auswahl einer Rotationsfläche. Damit ist es möglich, eine übliche Gleitlagerung mit den dabei auftretenden kinematischen Eigenschaften, abzubilden. Eine Verformung der Bohrung (Lochleibung) sowie das Auftreten der Hertzschen Pressung kann damit jedoch nicht nachgebildet werden. Dazu ist es notwendig, mit virtuellen Elementen zu arbeiten.

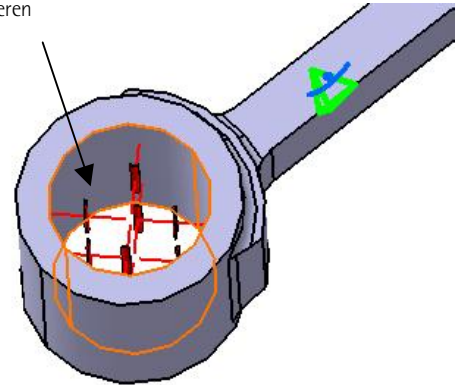
Bei der Definition eines rotatorischen Gleitlagers ist nach der Selektion des Icons 'Flächenloslager' folgendermaßen vorzugehen:

4 Definition der Randbedingungen

Definition eines rotatorischen Gleitlagers



Selektieren



Nach der Definition des Namens für die Gleitlagerung wählt man bei 'Supports' eine entsprechende Mantelfläche. Damit ist im oben angeführten Beispiel die Lagerung eines Pleuels im Kurbelzapfen definiert. Häufigstes Anwendungsbeispiel für rotatorische Gleitlager ist die Abbildung der Lagerungssituation in Bohrungen bzw. bei Bolzen. Sie finden dazu ein ausgeführtes Berechnungsbeispiel im Kapitel 3 (Gleitlager der Kurbelwelle).

4.1.3 Erweiterte Bedingung (Allgemeine Definition)

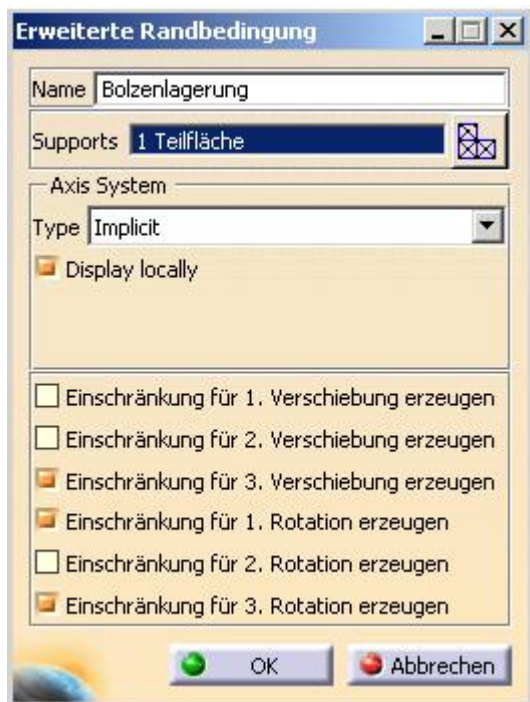
Die erweiterte Bedingung erlaubt das Sperren jeder beliebigen Kombination der Freiheitsgrade. Mit Hilfe dieser Bedingung ist eine Abbildung jeder gewünschten Randbedingung möglich. Man erhält zum Beispiel eine feste Einspannung, indem man alle sechs Freiheitsgrade sperrt. Die erweiterte Bedingung kann auf folgende Geometrielemente angewendet werden:

Selektierbare Geometrien

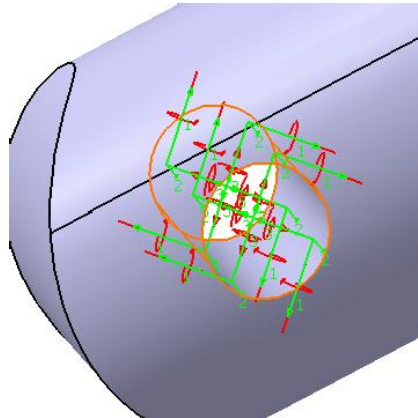
Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid or Surface)	Groups		
						 virtual part	

Es ist ersichtlich, dass Punkte, Kurven, Kanten, Flächen, Elementgruppen und virtuelle Teile als Support ausgewählt werden können. Nach Selektion des Icons erscheint ein weiteres Eingabefenster zur genaueren Definition.

4.1 Bedingungen direkt auf Bauteilgeometrie



Definition einer erweiterten Randbedingung



Nach der Eingabe des Namens wird im angeführten Beispiel als Support die Bohrungsmantelfläche gewählt. Bei 'Axis System' (Achsensystem) wird hier im Pull-down-Menü 'Implicit' ausgewählt, womit das lokale geometrieabhängige Koordinatensystem gemeint ist. Im Fall einer Bohrungsmantelfläche führt dies zu Zylinderkoordinaten. Dann sind die gewünschten Einschränkungen der Translationen sowie der Rotationen zu definieren. Dabei gibt es drei Freiheitsgrade für Translation und drei Freiheitsgrade für Rotation. Die Auswahl von 'Display locally' (Lokal anzeigen) stellt die Einschränkungen für Translation mit einem roten Pfeil und die Einschränkungen für Rotation mit einem roten Kreisbogen, jeweils im aktuellen Koordinatensystem, dar.

4.1.3.1 CATIA-Koordinatensysteme

In CATIA können generell drei unterschiedliche Typen von Koordinatensystemen definiert werden. Dabei unterscheidet man in:

4 Definition der Randbedingungen

- Globale Koordinatensysteme
- Implizite (Implicit) Koordinatensysteme
- User (Benutzer)-Koordinatensysteme

4.1.3.2 Globales Koordinatensystem

Das globale Koordinatensystem bezeichnet das standardmäßig vorhandene CATIA-Koordinatensystem. Das dazugehörige symbolische Achsensystem befindet sich am rechten unteren Rand des Zeichenbereichs.

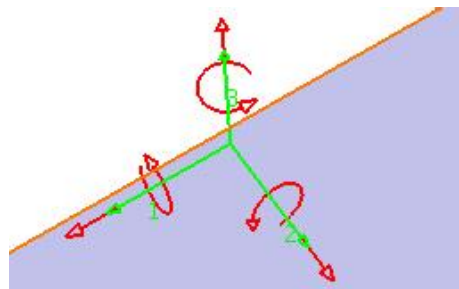
4.1.3.3 Implizite Koordinatensysteme

Diese sind abhängig von der ausgewählten Bezugsgeometrie. Man kann hier unterscheiden in:

1. Implizit-kartesische Koordinatensysteme
2. Implizit-zylindrische Koordinatensysteme

Implizit-kartesische Koordinatensysteme (X-,Y-,Z-Achse) erhält man durch Selektion einer ebenen Fläche, wobei in diesem Fall die Z-Achse normal auf die gewählte Fläche steht.

Implizit-kartesische Koordinatensystem; Z-Achse (3) normal auf die selektierte Fläche



Implizit-zylindrische Koordinatensysteme können durch Selektion einer Zylindermantelfläche definiert werden. Hier gilt folgende Konvention:

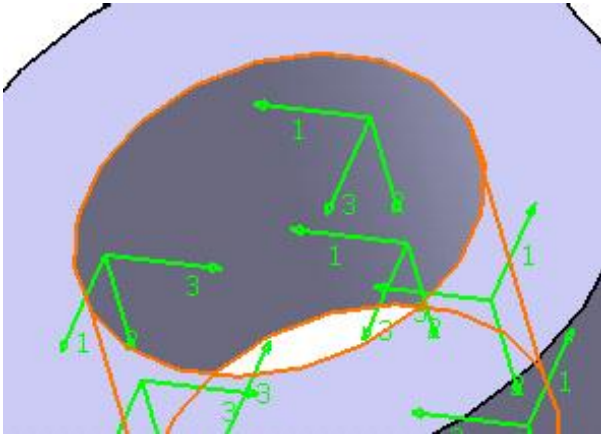
φ tangentiale Richtung = 1. Verschiebung

z Axiale Richtung = 2. Verschiebung

r Radiale Richtung = 3. Verschiebung

Bei den Rotationen wird die gleiche Reihenfolge eingehalten. Ein solches Koordinatensystem ist im unteren Bild lokal angezeigt.

4.1 Bedingungen direkt auf Bauteilgeometrie



Implizit-zylindrisches
Koordinatensystem
mit φ, z, r

4.1.3.4 User-Koordinatensysteme

Die User-Koordinatensysteme können vom Benutzer selbst definiert werden. Dabei können kartesische, zylindrische und Kugelkoordinatensysteme angelegt werden. Diese Koordinatensysteme basieren jedoch immer auf einem lokal erzeugten CAD-Achsensystem. Dieses lokale CAD-Achsensystem kann beispielsweise in der Arbeitsumgebung 'Part-Design' mit dem Icon 'Achsensystem' erzeugt werden.

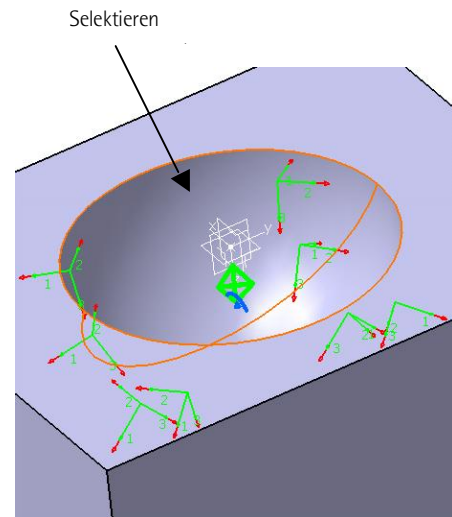
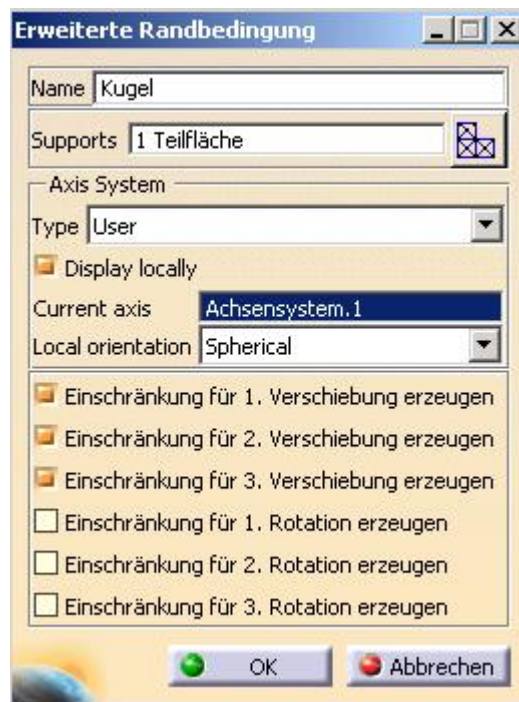


Achsensystem er-
zeugen

Im darauf folgenden Fenster ist in jedem Fall der Mittelpunkt des neuen Koordinatensystems zu selektieren. Die Achsen können optional beliebigen Richtungen zugeordnet und auch nach ihnen ausgerichtet werden. Die Anwendung der freien Bedingung auf ein Kugelkoordinatensystem führt zu folgendem Ergebnis:

4 Definition der Randbedingungen

Erweiterte Bedingung
mit User-
definiertem Kugel-
Koordinatensystem



Im Feld 'Current axis' ist das zuvor im Part-Design erzeugte, im Mittelpunkt der Kugel liegende CAD-Achsensystem zu wählen. Dann wird bei 'Local Orientation' auf ein Kugel-Koordinatensystem (Spherical) umgestellt.

4.1.4 Isostatische Randbedingung

Isostatische Randbedingungen ermöglichen es, einen Körper statisch eindeutig bestimmt zu unterstützen. Diese Randbedingung ist vor allem bei Frequenzanalysen sinnvoll, da damit eine Lagerung des Bauteils ohne Einfluss auf die errechneten Eigenformen möglich ist. Nicht realistische Eigenformen im untersten Frequenzbereich werden somit nicht ausgewiesen. Die Anwendung der isostatischen Bedingung beschränkt sich auf komplette Bauteile.

4.2 Virtuelle Elemente

Virtuelle Teile ermöglichen es dem Benutzer, fehlende Geometrien vereinfacht nachzubilden. Dies ist dann sinnvoll, wenn eine Abbildung der Randbedingungen sonst nicht ausreichend genau möglich ist. Virtuelle Teile repräsentieren im Prinzip Körper, für die keine Bauteilgeometrie verfügbar ist, die aber eine wichtige Rolle in

4.2 Virtuelle Elemente

der jeweiligen FEM-Analyse spielen. Meist ist es dazu notwendig, durch die Konstruktion eines Punktes die in einem gewissen Abstand befindliche Lagerung bzw. die Einleitung einer Last zu beschreiben. Es ist jedoch unersetzlich, dass zu jedem virtuellen Element entweder eine Last oder eine Lagerung definiert wird.

Folgende virtuelle Elemente sind in der GPS-Arbeitsumgebung verfügbar:



Bewegliches virtuelles Teil



Virtuelles Kontaktteil



Starres virtuelles Teil



Virtuelles Teil mit starrer Feder



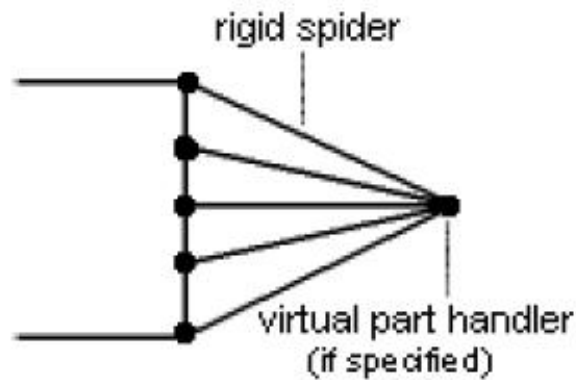
Virtuelles Teil mit beweglicher Feder

4.2.1 Starres virtuelles Teil

Ein starres virtuelles Teil verbindet einen ausgewählten Punkt mit einer bestimmten Bauteilgeometrie. Es verhält sich wie ein masseloses starres Objekt, welches ohne Zulassung von Verformung Bewegungen überträgt. Das starre virtuelle Element berücksichtigt auch in keiner Weise die elastischen Verformungen des Bauteils, auf das es sich bezieht. In diesem Fall können sich die Bezugsgeometrien lediglich bewegen und lassen einen Momentenausgleich zu. Eine Relativverschiebung der Geometrien ist nicht möglich. Dies führt zu einer Versteifung der Geometrie, die nicht der Realität entspricht. Die Vernetzung des starren virtuellen Elements erfolgt über ein 'Rigid Spider'-Element, das im unteren Bild ersichtlich ist.

4 Definition der Randbedingungen

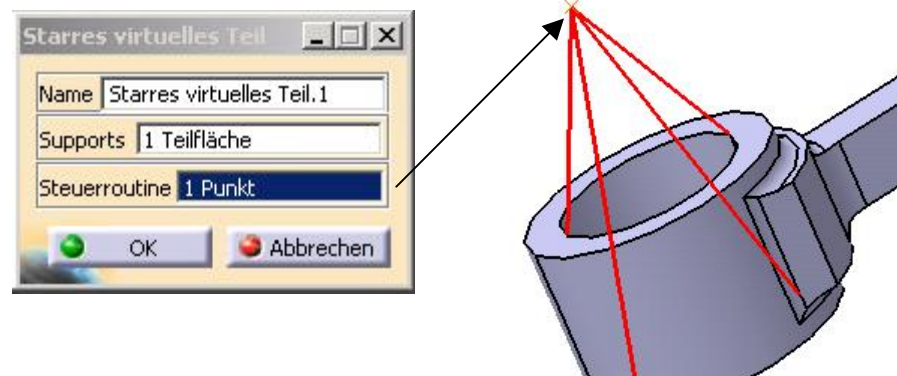
Vernetzung des starren virtuellen Elements



Unter dem 'Virtual part handler' ist der optional zu selektierende Geometriepunkt gemeint. Das Spider-Element besteht aus einem Master-Knoten und $n-1$ Slave-Knoten, und es hat drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade. Damit ist das kinematische Verhalten abbildbar.

Nach Auswahl des Icons für das starre virtuelle Teil erscheint folgendes Eingabefenster:

Definition eines starren virtuellen Elements



Der Name ist auch hier beliebig auszusuchen. Beim Eingabefeld 'Support' können an der bestehenden Bauteilgeometrie Flächen oder Kanten gewählt oder auch mehrere Elemente gleichzeitig definiert werden. Nach einer Positionierung im Eingabefeld 'Steueroutine' kann optional noch ein Punkt selektiert werden. Falls kein

Punkt gewählt wird, bestimmt CATIA automatisch das Zentrum, das ist der Punkt, in dem sich die Linien schneiden, als Steueroutine.

Als Anwendungsbeispiele für starre virtuelle Elemente sind folgende aufzuführen:

- Starre Fixierung (außerhalb der Bauteilgeometrie)
- Schweißverbindungen
- Lagerung über Gelenke (Drehgelenk)
- Gleitlager, falls Lochleibung und Hertzsche Pressung unbedeutend sind

4.2.2 Bewegliches virtuelles Teil

Ein bewegliches virtuelles Teil verbindet ebenfalls einen spezifizierten Punkt mit einer Bauteilgeometrie. Vom Verhalten ist es ein masseloses Objekt mit einer wesentlich geringeren Steifigkeit, welches damit auch die Geometrie nicht versteift. Ein Momentenausgleich ist möglich, das heißt, es werden damit die kinematischen Bedingungen der Freiheitsgrade berücksichtigt. Die Bezugsgeometrie kann sich entsprechend den Reaktionskräften verformen und auch bewegen. Nachdem damit sowohl Druckkräfte, aber auch Zugkräfte übertragen werden, stimmt die Verformung kaum mit der Realität überein.

Dieses virtuelle Element wird mit einem 'Smooth Spider'-Element nachgebildet. Dieses besteht aus einem Slave-Knoten und $n-1$ Master-Knoten.

Als Anwendung für das bewegliche virtuelle Teil kann die Nachbildung eines Gummilagers erwähnt werden.

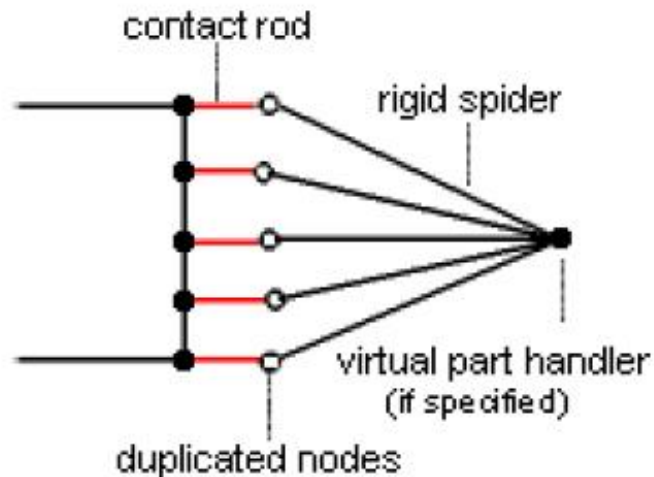
4.2.3 Virtuelles Kontaktteil

Vom generellen Aufbau her gesehen handelt es sich auch hier um ein virtuelles Teil, das einen definierten Punkt mit einer Bauteilgeometrie verbindet. Das masselose virtuelle Element überträgt die kinematischen Bedingungen, ohne die Geometrie zu versteifen. Es werden damit auch nur Druckkräfte übertragen, womit die Realität am genauesten abgebildet werden kann. Damit können bei einer Gleitlagerung von Welle und Bohrung sowohl Lochleibung als auch Hertzsche Pressung ermittelt werden.

Die Vernetzung des virtuellen Kontaktteils erfolgt über ein 'Rigid Spider'-Element und die Einarbeitung von Kontaktelementen.

4 Definition der Randbedingungen

Vernetzung des virtuellen Kontaktteils



Durch die zusätzliche Verwendung von Kontaktelementen (contact rod) mit drei translatorischen Freiheitsgraden ist es nunmehr möglich, die Strukturmechanik von Verbindungen abzubilden.

Als Support-Element bei der Definition des virtuellen Kontaktteils können auch hier Flächen und Kanten (hier sind auch mehrere möglich) angegeben werden. Die Steuerroutine versteht sich wiederum als Punkt, der entweder selektiert oder automatisch als Zentrumspunkt bestimmt wird.

Anwendungen für virtuelle Kontaktteile sind:

- Abbildung einer Welle-Bohrung-Gleitlagerung
- Nachbildung einer Presspassung
- Ermittlung der Lochleibung
- Ermittlung der Hertzschen Pressung

4.2.4 Beispiel zur Anwendung virtueller Teile

Im anschließend erklärten Beispiel soll noch einmal die unterschiedliche mechanische Wirkungsweise der virtuellen Elemente erläutert werden. Es handelt sich um ein Pleuel, das im Pleuelzapfen gleitgelagert ist. Die Belastung wird durch eine Lagerlast des Gleitlagers im kleinen Pleuelauge aufgebracht. Diese Belastung ist beim Expansionshub mit 250N anzusetzen.

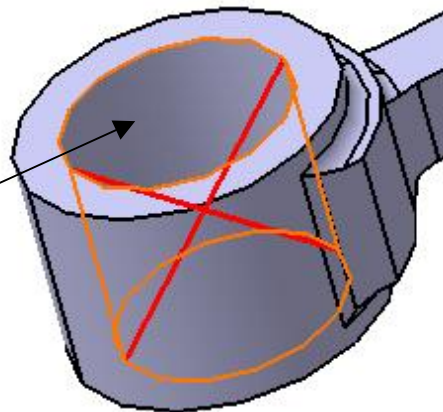
4.2 Virtuelle Elemente

Beginnen Sie mit dem Öffnen des Startmodells *'Pleuel1.CATPart'*. Nachdem bereits ein Material zugeordnet ist (in diesem Fall handelt es sich um ein Sintermetall C10), kann die Arbeitsumgebung GPS gestartet werden.

Definieren Sie nun zuerst die Randbedingungen zur statischen Bauteillagerung.

4.2.4.1 Lagerung mit starrem virtuellem Teil

Im ersten Fall verwenden Sie zur Lagerung des großen Pleuelauges im Kurbelzapfen ein starres virtuelles Teil.



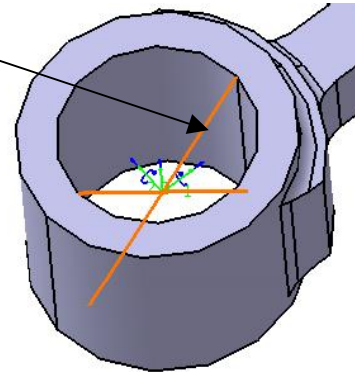
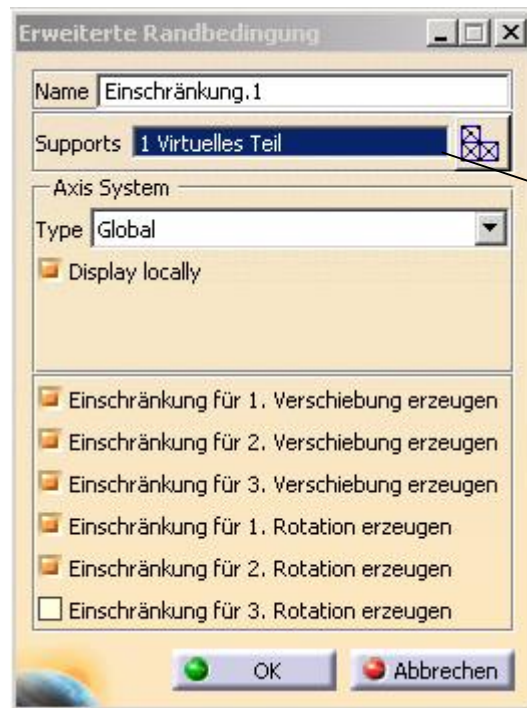
Starres virtuelles Teil
für das Gleitlager im
Kurbelzapfen

Als Geometrieelement wählen Sie die innere Mantelfläche des großen Pleuelauges. Nachdem kein Punkt selektiert wird, nimmt CATIA automatisch das Zentrum als Steueroutine.

Als Nächstes ist eine erweiterte Bedingung auf dieses virtuelle Element anzuwenden, um die Lagersituation zu beschreiben. Das Pleuelaugs kann sich an der Kurbelwange abstützen, womit nur die 3.Rotation freigegeben wird. Die Vorgangsweise dazu ist aus den nächsten Bildern ersichtlich:

4 Definition der Randbedingungen

Anwendung der erweiterten Bedingung auf das virtuelle Teil



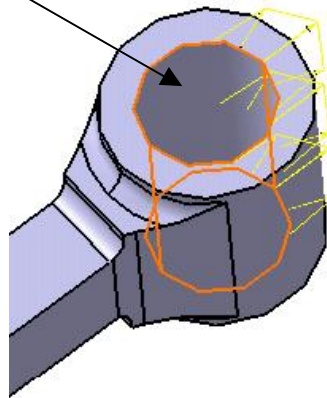
Im Eingabefenster selektieren Sie bei Support das starre virtuelle Teil entweder im Strukturbaum oder im Zeichenbereich. Die 3. Rotation geben Sie frei.

Nun muss im kleinen Pleuelauge noch die Lagerlast aufgebracht werden. Selektieren Sie dazu das Icon 'Lagerlast' im Pulldown-Menü des Icons 'Verteilte Last'.

Lagerlast



Im daraufhin erscheinenden Eingabefenster selektieren Sie als Support die innere Mantelfläche des kleinen Pleuelauges. Das Achsensystem bleibt auf der Einstellung 'Global'. Für die Lagerlast geben Sie in X-Richtung 250N und für den Winkel 90° ein. Die Ausrichtung soll radial und das Profil vom Typ sinusförmig sein.



Definition der Lagerlast im Bolzenlager (kleines Pleuelauge)

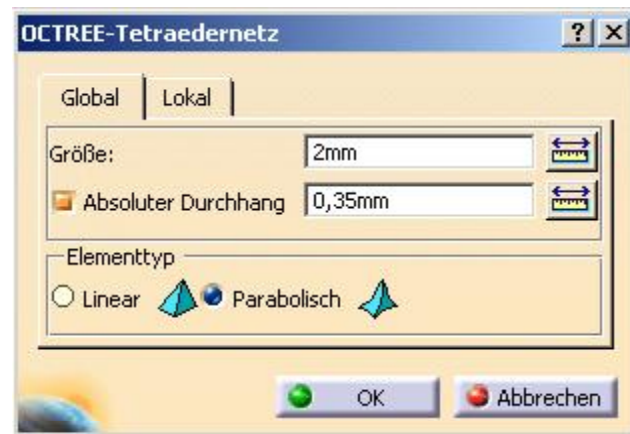
Nachdem diese Definitionen erfolgt sind, starten Sie die Berechnung mit dem Icon 'Berechnen'.



Nach erfolgreich abgewickeltem Berechnungsvorgang überprüfen Sie die Plausibilität dieses Ergebnisses. Danach verfeinern Sie das Netz durch einen Doppelklick auf das 'OCTREE-Tetraedernetz' im Strukturbaum.

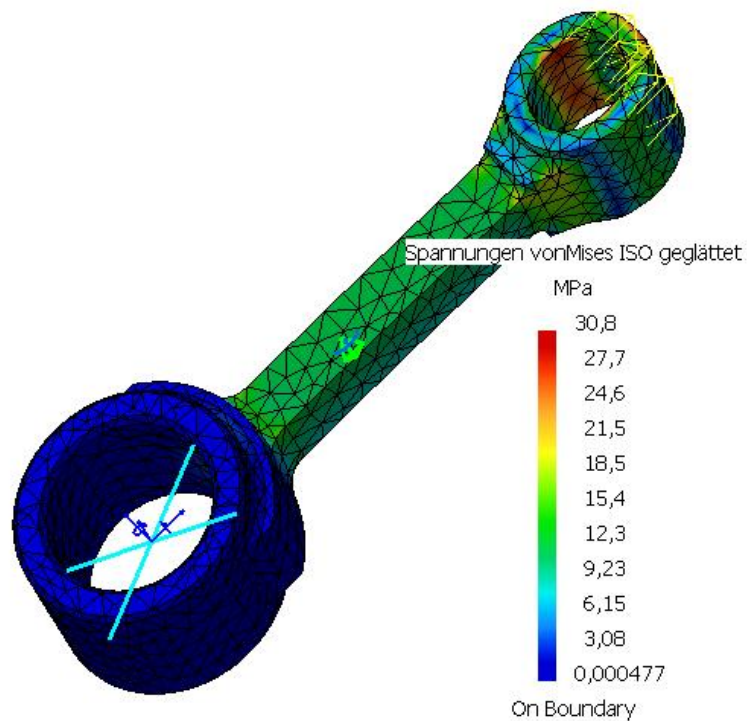
4 Definition der Randbedingungen

Parameter der
Vernetzung



Wählen Sie jetzt das parabolische Tetraederelement TE10 und reduzieren Sie die Elementgröße auf 2mm und den absoluten Durchhang (SAG-Wert) auf 0,35mm. Danach starten Sie die Berechnung erneut. Sie können dazu auch den File '*Star-res_virtuelles_Pleuel.CATAnalysis*' öffnen. Das Ergebnis sehen Sie im unteren Bild:

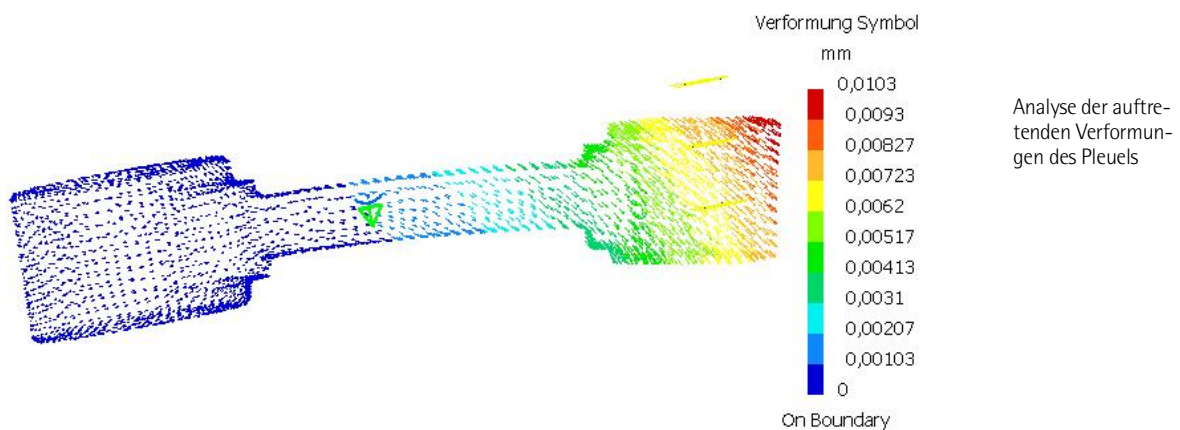
Berechnungsergebnis
mit starrem virtuellem
Teil bei Verwendung von
TE10-Elementen



4.2 Virtuelle Elemente

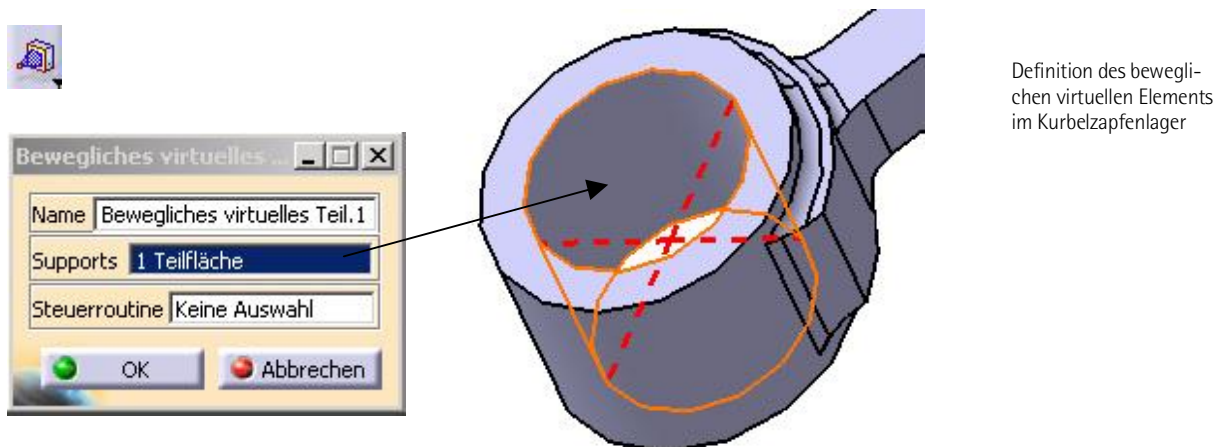
Im Bereich des Gleitlagers im großen Pleuelaugie treten keine Spannungen auf. Die höchsten Zugspannungen von 31 N/mm^2 findet man im kleinen Pleuelaugie.

Man sieht, dass die Bezugsgeometrie des starren virtuellen Teils sich bewegen, aber nicht verformen kann. Außerdem erkennt man bei der Analyse der Verformungen, dass aufgrund des geometrischen Versatzes des Pleuelschaftes das kleine Auge leicht nach unten wegdriftet.



4.2.4.2 Lagerung mit beweglichem virtuellen Teil

Öffnen Sie wiederum das Startmodell 'Pleuel1.CATPart'. In diesem Fall verwenden wir zur Lagerung des großen Pleuelauges im Kurbelzapfen ein bewegliches virtuelles Teil. Die Definition erfolgt analog zum vorigen Beispiel:

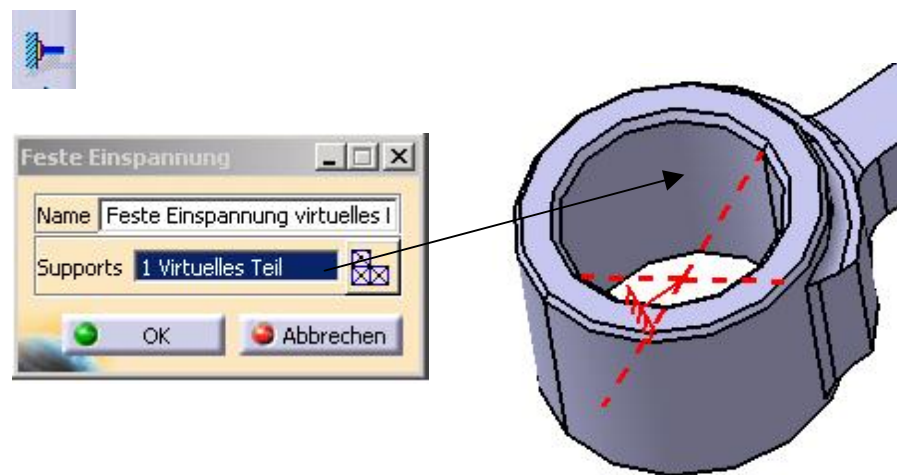


4 Definition der Randbedingungen

Als Geometrieelement selektieren Sie die innere Mantelfläche, die Steuerroutine wird automatisch bestimmt.

Da es sich nun um ein bewegliches virtuelles Teil handelt, ist für den vorliegenden Belastungsfall, in dem die Kraft gleichmäßig in Richtung der Kolbenachse wirkt, eine feste Einspannung des virtuellen Elements zu wählen. Ansonsten kann sich das virtuelle Element aufgrund des Freiheitsgrades der 3. Rotation um die Bohrungsachse drehen und führt damit zu einer Singularität. Diese kann mit Hilfe der festen Einspannung vermieden werden. Dazu gehen Sie folgendermaßen vor:

Definition der Einspannung des beweglichen virtuellen Teils

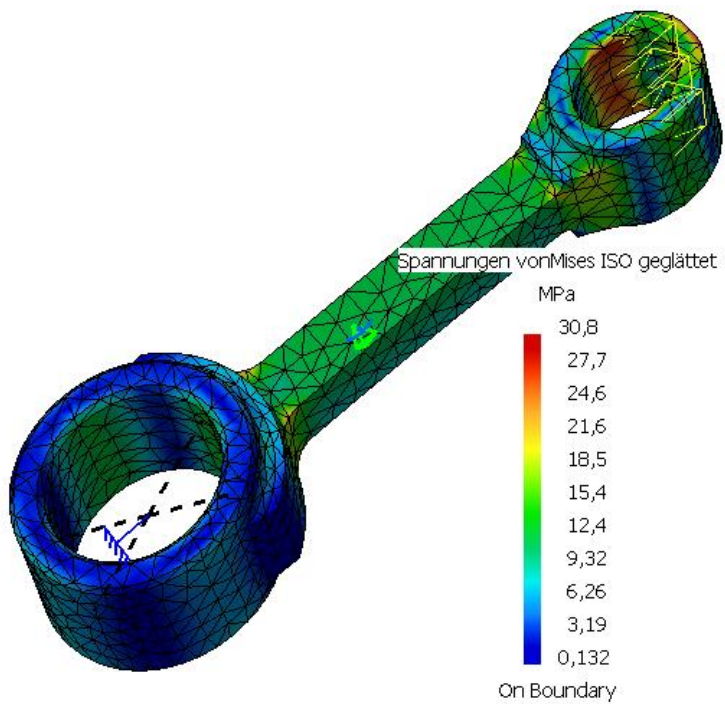


Im Feld 'Support' selektieren Sie das bewegliche virtuelle Element.

Die Lagerlast wird auf dieselbe Weise aufgebracht wie im vorherigen Beispiel beschrieben.

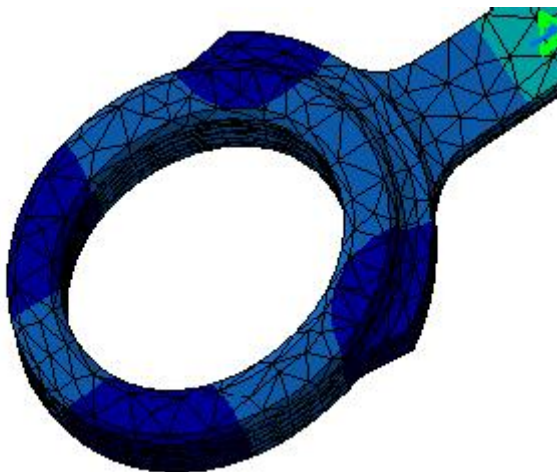
Dann kann die Berechnung mit linearen Tetraeder-Elementen (TE4) gestartet werden. Nach darauf erfolgter Plausibilitätskontrolle modifizieren Sie das Netz. Verwenden Sie nun ein parabolisches Tetraeder-Element (TE10) mit einer Größe von 2mm sowie einem SAG-Wert von 0,35mm. Die Berechnung kann auch wieder direkt aus dem File '*Bewegliches_virtuelles_Pleuel.CATAnalysis*' gestartet werden. Im Ergebnis zeigt sich ein ähnlicher Spannungsverlauf mit einer maximalen Zugspannung im kleinen Pleuelauge von 31 N/mm². Jedoch werden vom beweglichen virtuellen Element sowohl Zug- als auch Druckkräfte übertragen, was zu ausgewiesenen Spannungen und einer nicht der Realität entsprechenden Verformung im großen Pleuelauge führt.

4.2 Virtuelle Elemente



Berechnungsergebnis
mit beweglichem
virtuellem Teil unter
Verwendung von
TE10-Elementen

Bei der Analyse der Verformungen fällt vor allem die elliptische Deformation des großen Pleuelauges auf, die wie schon erwähnt nicht realitätsgetreu ist.



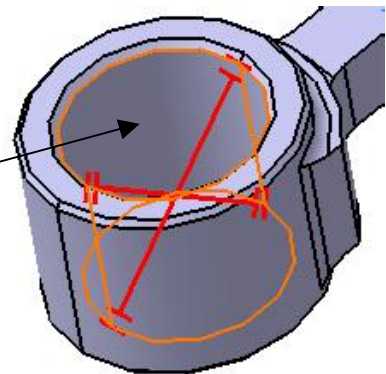
Verformung des großen
Pleuelauges

4 Definition der Randbedingungen

4.2.4.3 Lagerung mit virtuellem Kontaktteil

Ausgangspunkt ist wiederum das Modell *'Pleuel1.CATPart'*. Hier verwenden Sie ein virtuelles Kontaktteil zur Abbildung der Lagersituation im Pleurzapfen. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

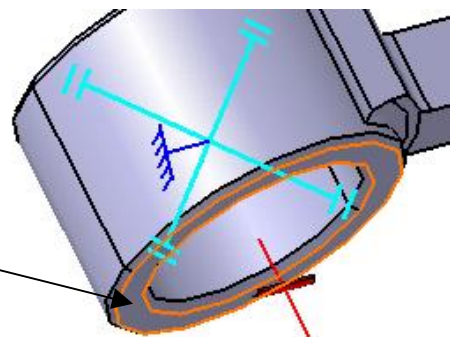
Definition des
virtuellen Kontakt-
teils



Im Feld 'Support' selektieren Sie die innere Mantelfläche des Pleuelauges. Die Steueroutine wird automatisch bestimmt und der Sicherheitsbereich bleibt auf 0 mm. Daraufhin ist das virtuelle Element analog zum vorigen Beispiel mit einer festen Einspannung zu versehen.

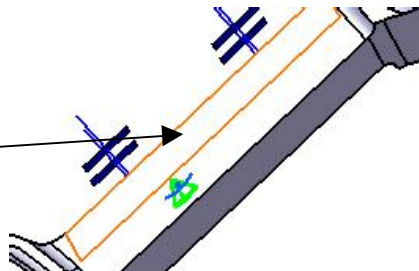
Um eine Bewegung des Pleuels in axialer Richtung zu vermeiden, kann sich das große Pleuelauge an der Pleurwange abstützen. Dies ist mit der Randbedingung eines ebenen Flächenloslagers abbildbar.

Definition eines
Flächenloslagers
zur axialen Fixie-
rung des Pleuels



4.2 Virtuelle Elemente

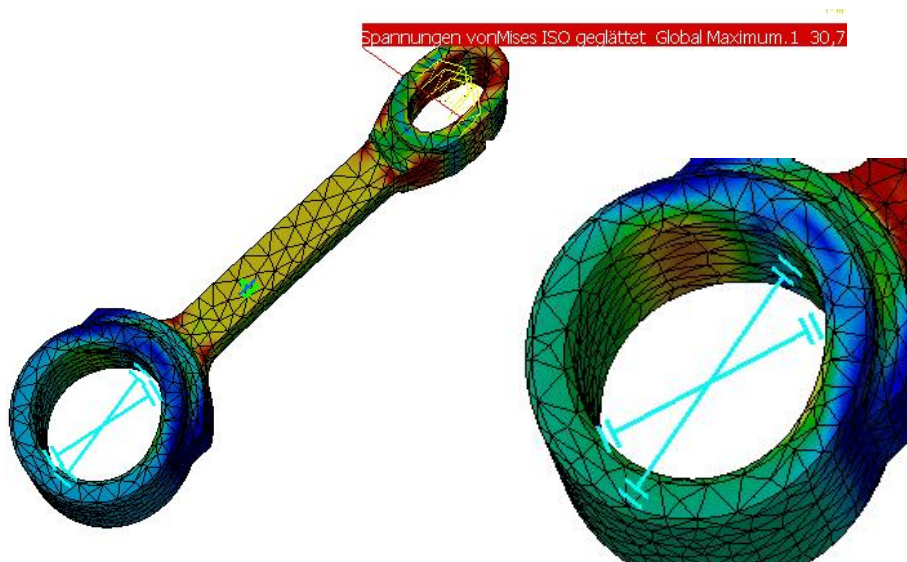
Da das virtuelle Kontaktteil auch eine Rotation des Pleuels um die Achse des großen Auges zulässt, ist auch dieser Freiheitsgrad durch ein Flächenloslager zu beseitigen. Dabei ist die seitliche Fläche des Pleuelschaftes zu selektieren. Diese Randbedingung stellt aufgrund der symmetrischen Belastung keine Beeinflussung des Ergebnisses dar.



Einschränkung des Freiheitsgrades der Rotation um die Achse des Kurbelzapfens

Schließlich müssen Sie noch die Lagerlast des kleinen Pleuelauges definieren. Die Vorgangsweise dazu ist bereits weiter oben beschrieben.

Nun starten Sie die erste Berechnung mit linearen Elementen und überprüfen die qualitative Spannungsverteilung. Danach stellen Sie wieder um auf ein parabolisches Tetraederelement der Größe 2mm mit einem SAG-Wert von 0,35mm. Die Ergebnisse dieser Berechnung erhalten Sie auch mit der Datei '*Virtualles_Kontaktteil_Pleuel.CATAnalysis*'.



Spannungsanalyse mit virtuellem Kontaktteil bei Verwendung von TE10-Elementen

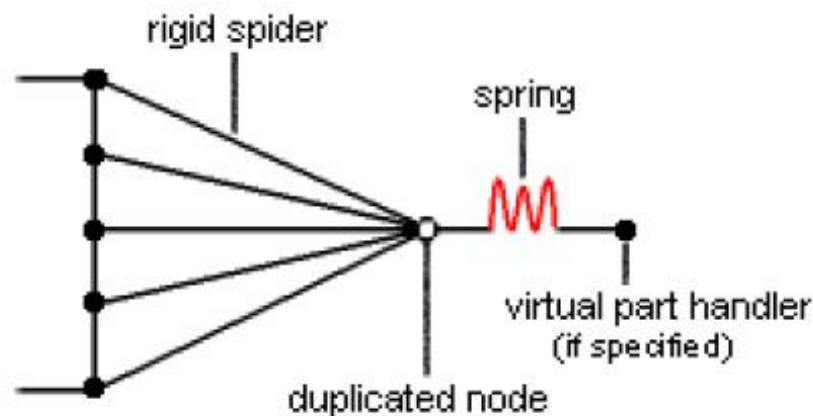
4 Definition der Randbedingungen

Die Größe der maximalen Zugspannung im kleinen Pleuelauge bleibt unverändert bei einem Wert von 31N/mm^2 . Deutlich sichtbar ist jetzt allerdings die auftretende Hertzsche Pressung im Bereich des Kubelzapfenlagers. Die Verformung des großen Pleuelauges entspricht nun am ehesten der Realität, da eindeutig die auftretende Lochleibung zu erkennen ist.

4.2.5 Virtuelles Teil mit starrer Feder

Ein virtuelles Teil mit starrer Feder ist ein elastischer Körper, der einen spezifizierten Punkt mit einer Bezugsgeometrie des Bauteils verbindet. Es verhält sich wie ein masseloser steifer Körper mit sechs Freiheitsgraden, welcher über die Steueroutine (Punkt) eingespannt und mit Kräften beaufschlagt werden kann. Die Bezugsgeometrie kann sich bewegen (kinematische Randbedingungen), jedoch nicht verformen, was zu einer Erhöhung der Steifigkeit der Bezugsgeometrie führt. Diese kann als unendlich steif angesehen werden. Dieses virtuelle Element wird über ein 'Rigid Spider'- und ein 'Spring'-Element abgebildet.

Vernetzung des
virtuellen Teils mit
starrer Feder



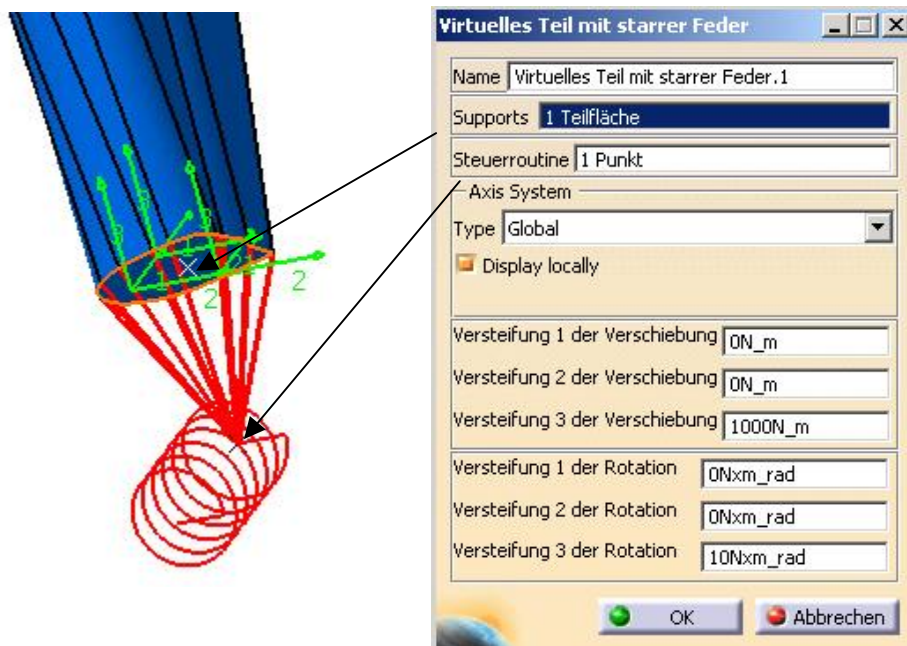
Das Spring-Element definiert zusätzlich drei translatorische und drei rotatorische Federsteifigkeiten.

Bei der Definition eines virtuellen Teils mit starrer Feder ist wie folgt vorzugehen. Nach der Auswahl des entsprechenden Icons erhält man das dargestellte Eingabefenster.



Icon für virtuelles Element mit starrer Feder

4.2 Virtuelle Elemente



Definition eines virtuellen Elements mit starrer Feder

Beim Feld 'Support' ist die Selektion einer Fläche oder Kante notwendig, bei 'Steuerroutine' kann optional ein Punkt gewählt werden. Das Koordinatensystem kann global oder User definiert festgelegt werden. Abschließend sind noch die entsprechenden Federsteifigkeiten in den gewünschten Richtungen einzugeben.

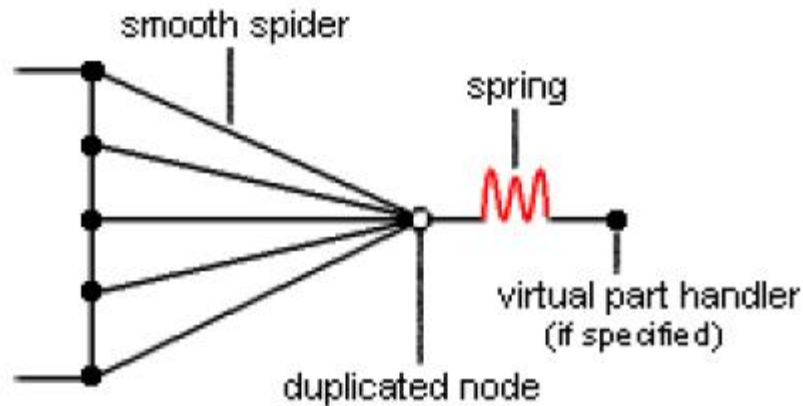
Ein Anwendungsbeispiel für dieses virtuelle Element ist die Fixierung eines Bauteils an einer oder mehreren Federn.

4.2.6 Virtuelles Teil mit beweglicher Feder

Das virtuelle Teil mit beweglicher Feder arbeitet im Prinzip ähnlich zum vorher beschriebenen Teil, außer dass sich bei einer elastischen Feder die Bezugsgeometrie bewegen und verformen kann. Damit tritt auch keine ungewollte Versteifung des Bauteils, auf das es angewendet wurde, ein. Die Vernetzung erfolgt durch Verwendung eines 'Smooth Spider'-Elements anstatt des starren Spinnenelements. Der Aufbau dieser Elemente wurde bereits in den Kapiteln 4.2.1 bzw. 4.2.2 beschrieben.

4 Definition der Randbedingungen

Vernetzung des
virtuellen Teils mit
beweglicher Feder



Als Bezugselemente an der Bauteilgeometrie können auch hier Flächen (auch mehrere auf einmal) und Kanten selektiert werden. Anwendungsbeispiele wären hier die elastische Lagerung eines Bauteils an einer Feder sowie die Nachbildung der Funktionsweise eines Kugelgelenks.

Die Definition eines virtuellen Teils mit beweglicher Feder erfolgt vollkommen analog zu der unter 4.2.5 beschriebenen Vorgangsweise und wird hier nicht näher erläutert.

4.3 Randbedingungen über virtuelle Teile

Die im Folgenden beschriebenen Randbedingungen zur Bauteillagerung sind nur im Zusammenhang mit virtuellen Elementen anwendbar. Diese Randbedingungen stellen typische mechanische Standardlagerungen dar und sollen dem Benutzer ein einfacheres Arbeiten ermöglichen. Im Prinzip können alle diese Bedingungen nach entsprechender Definition der Einschränkungen auch mit dem Icon 'Erweiterte Randbedingung' erhalten werden.



Loslager



Gleitdrehpunkt

4.3 Randbedingungen über virtuelle Teile



Kugelgelenkverbindung

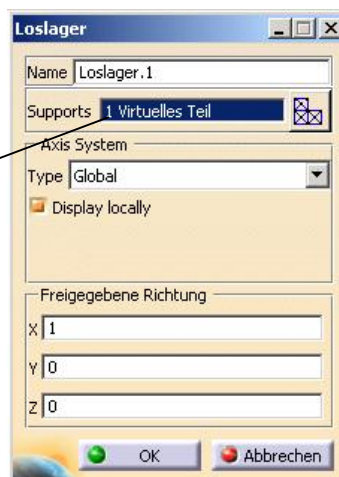
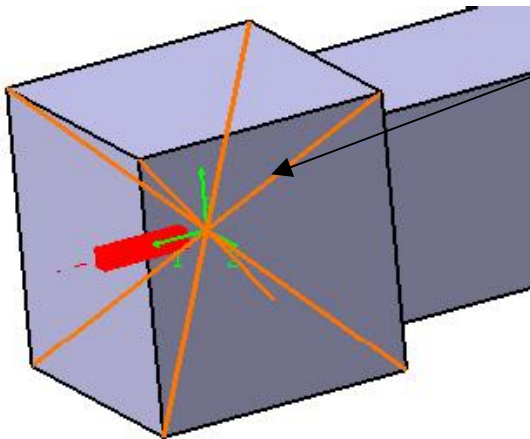


Drehpunkt

4.3.1 Loslager

Diese Bedingung wird auf die Steuerroutine (Punkt) eines virtuellen Elements angewendet und ermöglicht die Verschiebung entlang einer freigegebenen Richtung. Der Einfachheit halber kann man sich ein Vierkantprofil in einem Formrohr gelagert vorstellen. Auch hier ist nur eine Verschiebung entlang der Längsachse möglich.

Bei der Definition dieser Randbedingung ist nach dem Aufruf des entsprechenden Icons folgender Weg einzuhalten.



Definition eines Loslagers über ein virtuelles Element

Beim Eingabefeld für Supports ist das virtuelle Teil zu wählen. Hier ist ein starres virtuelles Teil mit den vier seitlichen Bezugsflächen des Quaders und dem so entstehenden Zentrum als Steuerroutine definiert. Als Achsensystem wird in diesem Fall das globale System gewählt und die Einstellung 'Display locally' aufgerufen, um die Achsen zu visualisieren. Im unteren Teil des Eingabefeldes kann man definieren, welche Bewegung möglich ist. Hier wurde die X-Richtung freigegeben, was auch symbolisch durch einen in dieser Richtung liegenden Zylinder dargestellt wird.

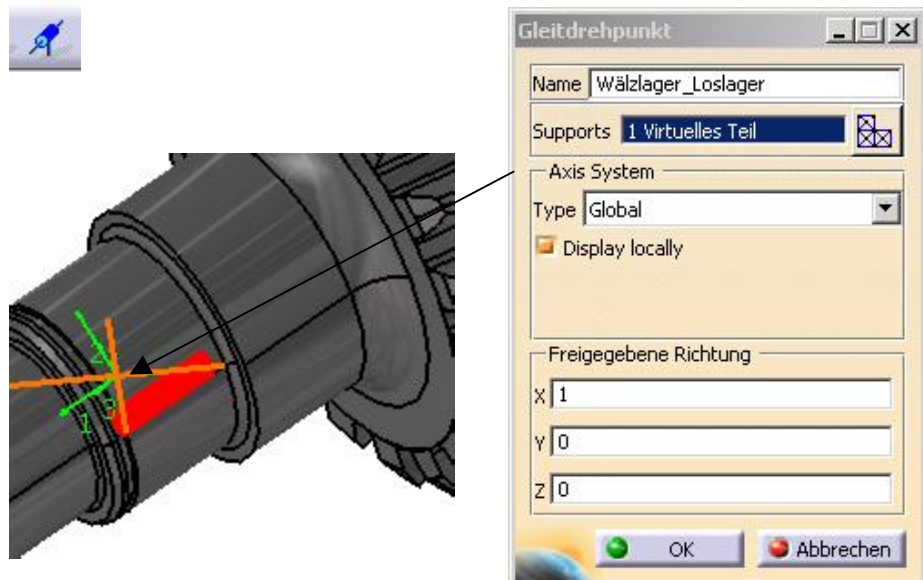
4 Definition der Randbedingungen

4.3.2 Gleitdrehpunkt

Diese Randbedingung ermöglicht eine Verschiebung sowie eine Rotation entlang bzw. um eine freigegebene Achse. Auch hier ist in jedem Fall ein virtuelles Element zu selektieren. Verglichen werden kann diese Randbedingung mit der Lagerung einer Welle in einem Wälzlager, das als Loslager ausgeführt ist.

Die Definition ist in den untenstehenden Abbildungen ersichtlich:

Definition eines
Gleitdrehpunkts
(Loslager einer in
Wälzlager gelagerten Welle)



Das virtuelle starre Teil wurde mit der Zylindermantelfläche der Lagerstelle definiert. Dieses virtuelle Teil ist im Eingabefenster als Support zu wählen, und im globalen Achsensystem ist die X-Richtung freizugeben. Damit ist die Verschiebung entlang dieser Achse und die Rotation um diese Achse möglich.

4.3.3 Kugelgelenkverbindung

Diese Randbedingung ermöglicht drei rotatorische Freiheitsgrade, alle Verschiebungen sind hingegen gesperrt. Klassischer Anwendungsfall ist ein Kugelgelenk.

Bei der Definition ist im Eingabefeld 'Support' ein virtuelles Element zu selektieren, die Freiheitsgrade der Rotation sind automatisch freigegeben.

4.3 Randbedingungen über virtuelle Teile



Icon Kugelgelenk



Definition einer Kugelgelenkverbindung

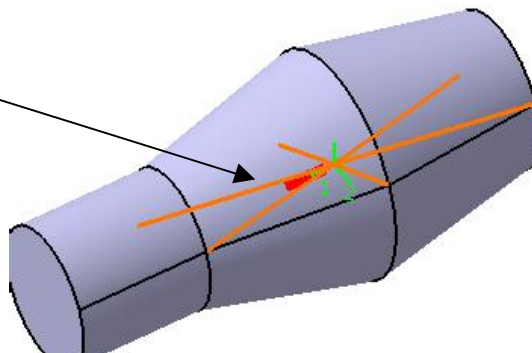
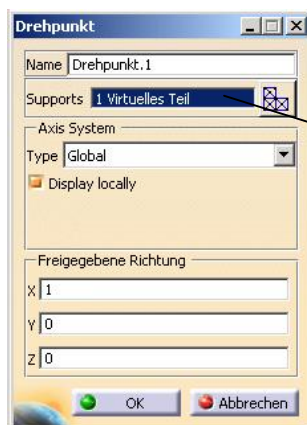
Im Kapitel 9 'Übungsbeispiele' ist in der FEM-Berechnung des Kipphebels die Anwendung eines Kugelgelenks erläutert.

4.3.4 Drehpunkt

Diese Bedingung ist ein Spezialfall eines Gleitdrehpunkts, da hier zwar eine Rotation um die Achse möglich ist, nicht aber eine Verschiebung. Man könnte sie besser als Drehgelenk ohne Querverschiebung bezeichnen. Ein Anwendungsfall ist die konische Lagerung einer Welle.



Bei der Definition ist wie folgt vorzugehen:



Definition eines Drehpunkts

Bei der Definition des virtuellen Elements werden in diesem Fall konische Mantelflächen gewählt. Damit ist eine Verschiebung entlang der Kegelachse nicht mehr möglich, jedoch die Rotation um diese Achse.

4 Definition der Randbedingungen

4.4 Zusammenfassende Übersicht

In der unteren Tabelle finden Sie abschließend eine Übersicht der wichtigsten Randbedingungen, die Ihnen in der Arbeitsumgebung GPS zur Verfügung stehen.

In der Zeile Support ist ersichtlich, ob als Stützelement direkte Bauteilgeometrie selektiert werden kann oder ob man vorher ein virtuelles Element definieren muss. Als virtuelle Elemente können alle zuvor beschriebenen zum Einsatz kommen.

Daran anschließend findet sich eine Aufstellung, wie die sechs Freiheitsgrade festgelegt werden. Fixiert bedeutet, dass Kraft in dieser Richtung übertragen werden kann. Bei der erweiterten Bedingung kann der Benutzer jede beliebige Kombination selbst erstellen, und zwar unter Verwendung von kartesischen Koordinaten, Zylinderkoordinaten und Kugelkoordinaten. Beim Gleitdrehpunkt ist sowohl eine Verschiebung als auch eine Rotation frei, allerdings muss es sich um dieselbe Achse handeln.

Übersicht der
möglichen Rand-
bedingungen

Randbedingung	Feste Einspannung	Flächenloslager	Erweiterte Bedingung	Loslager	Gleitdrehpunkt	Kugelgelenkverbindung	Drehpunkt
Symbol							
Support	Geometrie Virtuelles Teil	Geometrie	Geometrie Virtuelles Teil	Virtuelles Teil	Virtuelles Teil	Virtuelles Teil	Virtuelles Teil
Verschiebung X	fixiert	frei	definieren	eine	eine	fixiert	fixiert
Verschiebung Y	fixiert	frei	definieren	Richtung	Richtung	fixiert	fixiert
Verschiebung Z	fixiert	fixiert	definieren	frei	frei	fixiert	fixiert
Rotation X	fixiert	fixiert	definieren	fixiert	eine	frei	eine
Rotation Y	fixiert	fixiert	definieren	fixiert	Rotation	frei	Rotation
Rotation Z	fixiert	frei	definieren	fixiert	frei	frei	frei

4.5 Berücksichtigung von Bauteilsymmetrien

Die Berücksichtigung von Bauteilsymmetrien vereinfacht den Berechnungsprozess. Es muss nicht mehr der gesamte Bauteil berechnet werden, sondern nur die Hälfte bzw. ein Teilsegment. Dies reduziert in erheblichem Maße die notwendigen Ressourcen bei einer FEM-Analyse.

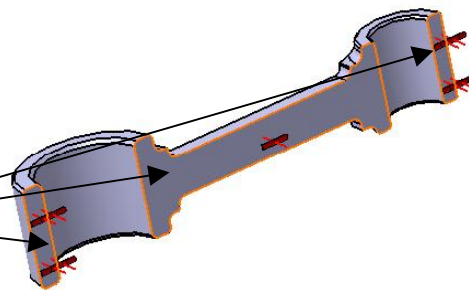
4.5 Berücksichtigung von Bauteilsymmetrien

4.5.1 Symmetrierandbedingung

Um eine Symmetrierandbedingung nützen zu können, müssen folgende Voraussetzungen gegeben sein:

- Der Bauteil muss symmetrisch sein.
- Die Bauteillagerung muss symmetrisch sein.
- Die Lasteinleitung muss symmetrisch sein.

Das Definieren der Symmetrierandbedingung erfolgt mittels des Icons 'Flächenloslager', und zwar so, dass alle Flächen in der Symmetrieebene als Flächenloslager definiert werden. Handelt es sich um Bauteile, die zwei Symmetrieebenen aufweisen, lassen sich diese auf ein Viertelteil reduzieren. Die Vorgangsweise zur Definition der Symmetrierandbedingung ist im unteren Bild dargestellt.



Definition der
Symmetrierandbe-
dingung

Zu beachten ist, dass bei Berücksichtigung der Symmetrie eine auf den Bauteil wirkende Kraft halbiert werden muss, eine Druckbeanspruchung jedoch unverändert angesetzt wird, da der Druck ohnehin als Kraft pro Fläche definiert ist.

4.5.2 Periodizitätsbedingung

Die Periodizitätsbedingung ist vor allem bei rotationssymmetrischen Bauteilen anwendbar. Der Vorteil besteht wiederum in der Einsparung von benötigten Ressourcen. Diese Randbedingung wird mit dem Icon 'Periodizitätsbedingung' definiert.

4 Definition der Randbedingungen

Periodizitätsbedingung

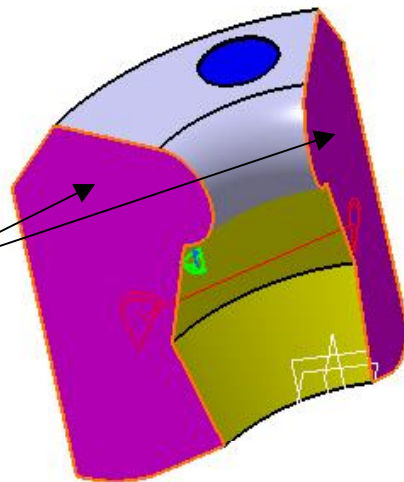


Dieses Icon befindet sich in der Symbolleiste 'Virtuelles Teil', ist jedoch von der Wirkungsweise nicht zu diesen zu rechnen.

Ein abschließendes kurzes Beispiel soll den Vorteil des Arbeitens mit Symmetrieverbindungen verdeutlichen. Es handelt sich hierbei um einen druckbelasteten Ring, der rotationssymmetrisch ausgeführt ist.

Als ersten Schritt öffnen Sie das Modell *'Rotationssymmetrie.CATPart'*. Daraufhin wird die Arbeitsumgebung GPS gestartet. Definieren Sie nun die Periodizitätsbedingung.

Definition der Periodizitätsbedingung



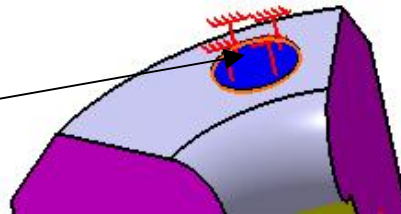
Im Eingabefenster sind bei 'Supports' die beiden Symmetrieflächen zu selektieren, womit ein eigenes Periodizitätsverbindungsnetz definiert wird.

In weiterer Folge wird der Bauteil an der oberen blauen Fläche fix eingespannt.



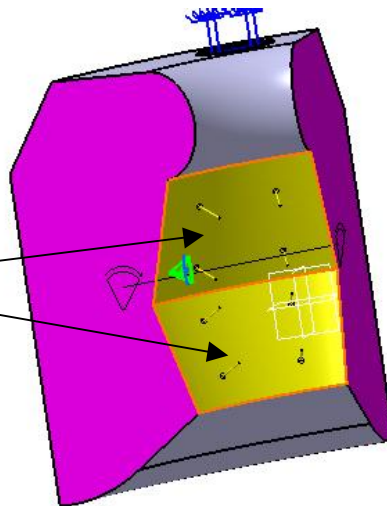
Feste Einspannung

4.5 Berücksichtigung von Bauteilsymmetrien



Definition der festen
Einspannung

Die beiden inneren Teilflächen werden mit einem Druck von 60 bar beaufschlagt.



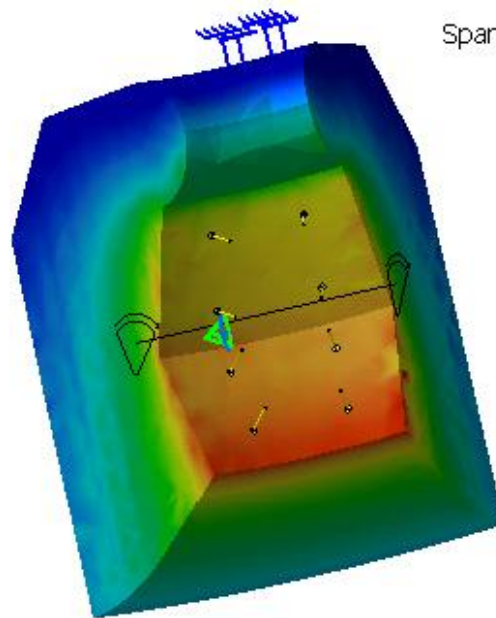
Definition der Druck-
beanspruchung von
60bar

Wählen Sie dazu die beiden im oberen Bild dargestellten Bauteilflächen aus, und rechnen Sie den Druck in die Einheit MPa um.

Nach einer ersten Netzverfeinerung und Durchführung der Berechnung mit parabolischen Elementen Tetraeder-Elementen TE10 - Sie können dazu auch die Datei 'Rotationssymmetrie.CATAnalysis' verwenden -, erhalten Sie folgende Spannungsverteilung:

4 Definition der Randbedingungen

Charakteristischer
Spannungsverlauf bei
Verwendung der Ro-
tationssymmetrie-
Bedingung



Spannungen von Mises ISO geglättet

MPa

14

12,6

11,3

9,92

8,55

7,19

5,83

4,46

3,1

1,74

0,372

On Boundary

Aufgrund des gleichmäßigen Spannungsverlaufs in der Symmetrieebene, ist erkennbar, dass die Rotationssymmetrie korrekt definiert und angewendet wurde. Da das berechnete Segment nur ein Sechstel des gesamten Teils beträgt, wurden damit auch die benötigten Systemressourcen um 83% reduziert.

5 Definition der Lasteinleitung

In diesem Kapitel werden die diversen Möglichkeiten zur Definition der Lasteinleitung beschrieben. In der unteren Tabelle findet sich wiederum eine Aufstellung der dazu angebotenen Icons mit der jeweiligen englischen Bezeichnung sowie deren Verfügbarkeit in den CATIA-FEM Produkten.

Loads		GP1	GPS	EST	GAS	GDY
	Pressures					
	Distributed Force					
	Moment					
	Bearing Load					
	Importing Forces					
	Importing Moments					
	Line Force Density					
	Surface Force Density					
	Body Force					
	Force Density					
	Acceleration					
	Rotation Force					
	Enforced Displacement					
	Creating Temperature Field					

Möglichkeiten zur Lasteinleitung und deren Verfügbarkeit in den einzelnen FEM-Produkten

5 Definition der Lasteinleitung

Die Beschreibung der einzelnen Produkte findet sich bereits im Kapitel 3. Im Folgenden wird nun eine genaue Beschreibung der einzelnen Icons zur Lasteinleitung und deren Anwendung auf Bauteile bzw. virtuelle Elemente durchgeführt.

5.1 Druck

Die Beaufschlagung eines Bauteils mit Druck bewirkt eine Belastung normal auf die selektierte Fläche. Folgende Bauteilgeometrien können ausgewählt werden:

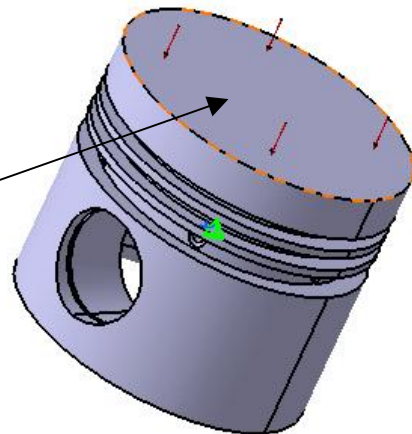
Mögliche Stützelemente beim Druck

Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid / Surface)	Groups		
							

Um eine Druckbelastung zu definieren, verwendet man das Icon 'Druck'.



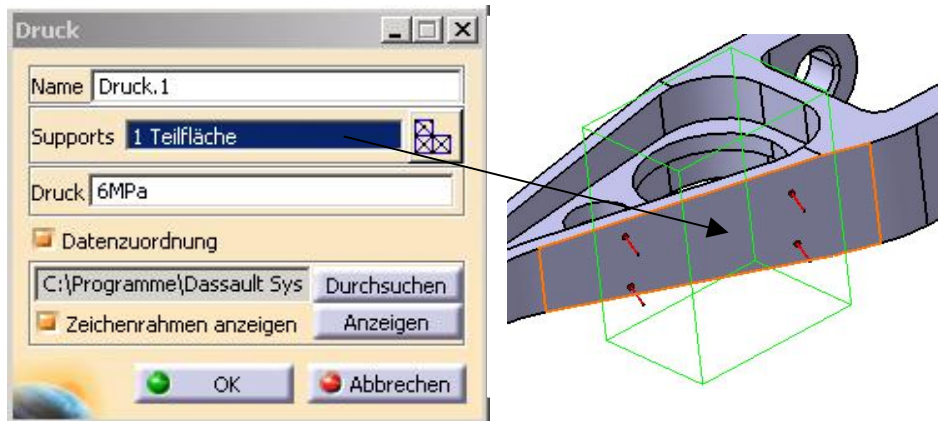
Definition einer Druckbelastung



Im folgenden Eingabefenster kann wiederum ein entsprechender Name verwendet werden. Beim Feld für den Support ist am Bauteil eine entsprechende Geometrie zu selektieren. Die Standardeinheit für den Druck wurde aus den bereits zuvor beschriebenen Gründen mit MPa (Megapascal) festgelegt, kann jedoch jederzeit auch auf N/m^2 umgestellt werden. Ein Auswählen des Eintrags 'Datenzuordnung' ermöglicht das Einlesen einer Druckverteilung über eine entsprechende Excel-Tabelle.

5.1 Druck

Dabei ist folgende Vorgangsweise einzuhalten: Zuerst wird wiederum die Fläche, auf die der Druck definiert wird, selektiert.



Vorgangsweise bei der Datenzuordnung

Nach der Eingabe des gewünschten Drucks aktiviert man die Datenzuordnung und wählt über die Taste 'Durchsuchen' eine zuvor angelegte Excel- oder Textdatei, die beispielhaft folgendes Aussehen hat:

Imported Table			
X(mm)	Y(mm)	Z(m)	Koeffiz.(%)
-20	0	0	50
-21	14	0	50
-22	-16	0	50
0	0	0	100
0	16	0	100
0	-14	0	100
20	0	0	150
21	15	0	150
22	-15	0	150

Tabelle zur Festlegung eines Druckverlaufs

Sehr wichtig ist, dass in der ersten Zeile der ersten drei Spalten die gewünschte Einheit, in runden Klammern stehend, angegeben wird, da ansonsten keine Zuordnung möglich ist. In der vierten Spalte steht der Prozentsatz des Drucks, der global ange-






5 Definition der Lasteinleitung

geben wurde. Die Angabe einer Einheit ist hier nicht notwendig. Auf diese Weise kann ein entsprechender Druckverlauf über die gewählte Fläche definiert werden.

5.2 Verteilte Last

Damit kann eine Belastung entlang einer beliebig gewählten Richtung auf ein Bauteil bzw. auf ein virtuelles Element definiert werden. Als Support für die verteilte Last können folgende Elemente selektiert werden:

Selektierbare Stützelemente für die verteilte Last

Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid / Surface)	Groups		
						 virtual part	

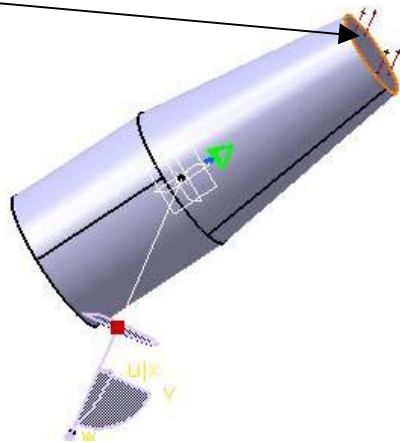
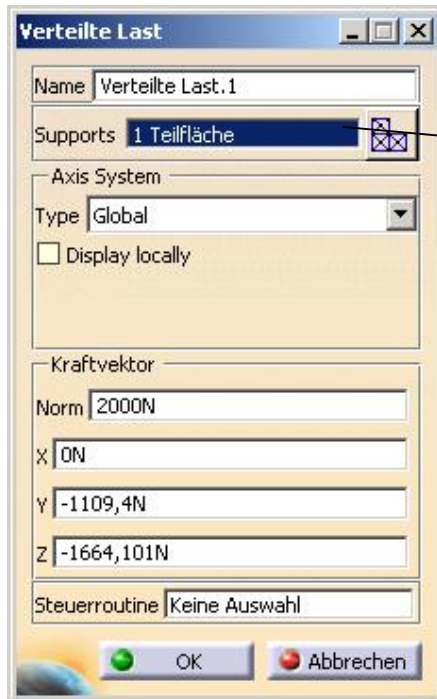
Man sieht, dass Punkte, Flächen, Gruppen und virtuelle Teile als Stützelemente dienen können. In jedem Fall aber zeigen alle Kraftvektoren nach erfolgter Definition in dieselbe Richtung, da es sich immer um eine vektoriell gerichtete Kraft handelt. Bei der Definition der verteilten Last ist folgendermaßen vorzugehen:

Verteilte Last



Zuerst ruft man das Icon 'Verteilte Last' auf, womit man ein weiteres Eingabefenster erhält. Dort sind die zusätzlichen Eingaben zur Bestimmung der vektoriellen Kraft zu tätigen:

5.2 Verteilte Last



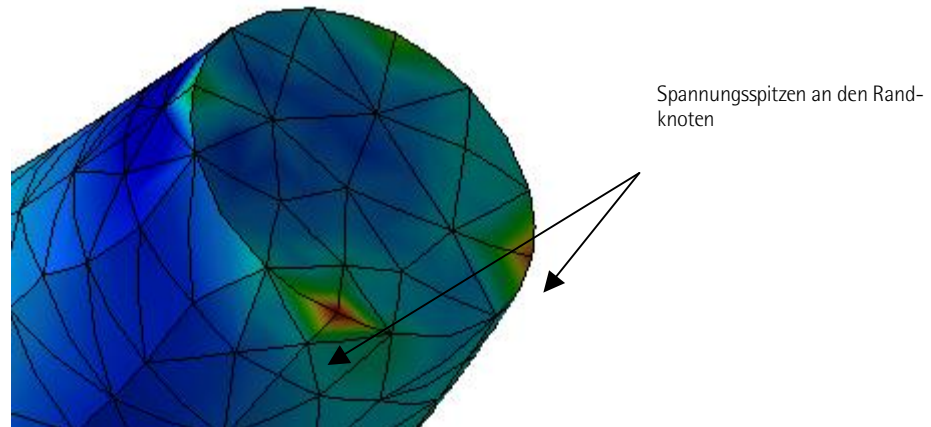
Definition einer
vektoriell gerichteten,
verteilten Last

Im Eingabefeld für Support ist jene Fläche zu wählen, auf welche die Kraft wirken soll. Weiters kann zwischen dem globalen und einem User-Koordinatensystem unterschieden werden. Um die Krafrichtung zu bestimmen, nimmt man am einfachsten den am rechten oberen Bildschirmrand befindlichen Kompass und zieht ihn bei gedrückter linker Maustaste über die gewünschte Richtung. Nach Freigabe der linken Maustaste orientiert sich die verteilte Kraft genau entlang dieser selektierten Richtung, und die resultierende Kraft, die man im Feld 'Norm' eingibt, wird auf die X-, Y- und Z-Richtung verteilt. Es ist natürlich auch möglich, die jeweilige Kraftkomponente in den drei Richtungen einzugeben und damit die vektorielle Ausrichtung zu erhalten.

Der große Nachteil der verteilten Kraft ist jener, dass es sich um eine vektorielle Komponente handelt, die somit an den entsprechenden Elementknoten wirkt. Dies führt meist zu einer sehr ungleichmäßigen Verteilung, bezogen auf die selektierte Fläche. Damit ergeben sich in der Folge Spannungsspitzen an jenen Elementen, die im Randbereich dieser Fläche liegen. Eine solche nicht der Realität entsprechende Spannungsverteilung ist im unten angeführten Bild zu sehen:

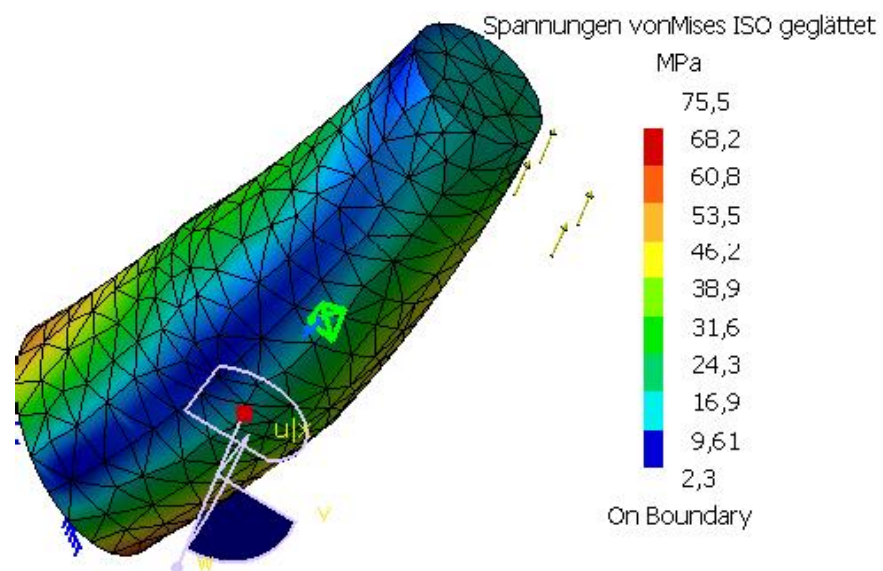
5 Definition der Lasteinleitung

Spannungsverteilung
bei Berechnung mit
einer verteilten Last



Um diesen Effekt zu vermeiden, muss man entweder das Netz verfeinern, oder man definiert statt der verteilten Last eine Flächenlast, die nicht am Knoten, sondern direkt am Element angreift. Eine auf diese Weise durchgeführte FEM-Analyse liefert folgende Spannungsverteilung:






Spannungsverteilung
bei Definition einer
Flächenlast anstelle
der verteilten Last



Die Spannungsspitzen, die zuvor an den Randknoten aufgetreten waren, sind nun eliminiert. Das Berechnungsergebnis ist so qualitativ richtig.

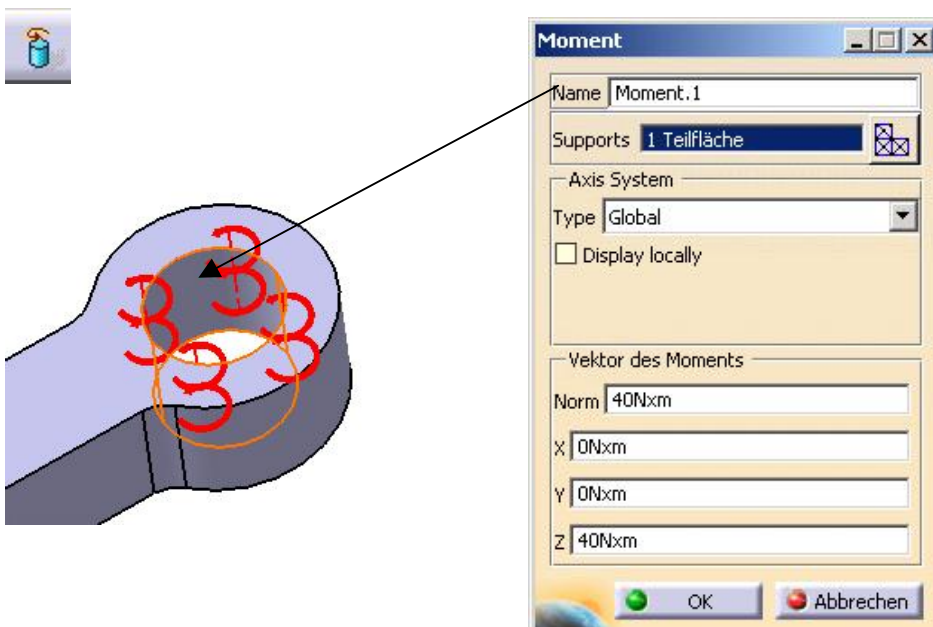
5.3 Moment

Mit diesem Befehl wird eine Momentenbelastung an einem Bauteil definiert. Als Stützelement für das Moment können folgende Eingaben getroffen werden:

Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid / Surface)	Groups		
						 virtual part	

Stützelemente bei einer Momentenbelastung

Man kann Punkte, Kanten, Flächen, Gruppen und virtuelle Teile als Support für das Moment definieren. Zur Festlegung der Richtung kann auch hier der Kompass zu Hilfe genommen werden. Die Definition eines Moments erfolgt auf folgende Weise:



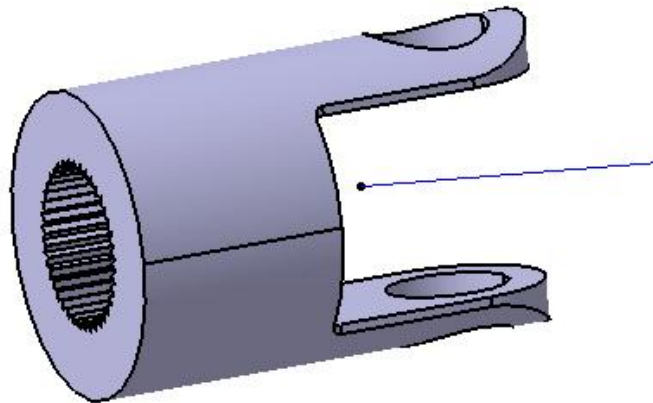
Definition einer Momentenbelastung

5 Definition der Lasteinleitung

Nach der Selektion des Stützelements kann der Momentenvektor im globalen oder im User-Koordinatensystem definiert werden. Es ist wiederum eine Aufteilung in drei Richtungen entweder über eine direkte Eingabe oder über die Ausrichtung des Kompasses möglich.

Um die Definition eines Moments über ein virtuelles Element zu veranschaulichen, ist noch der Anwendungsfall bei einem Kardangelenk dargestellt.

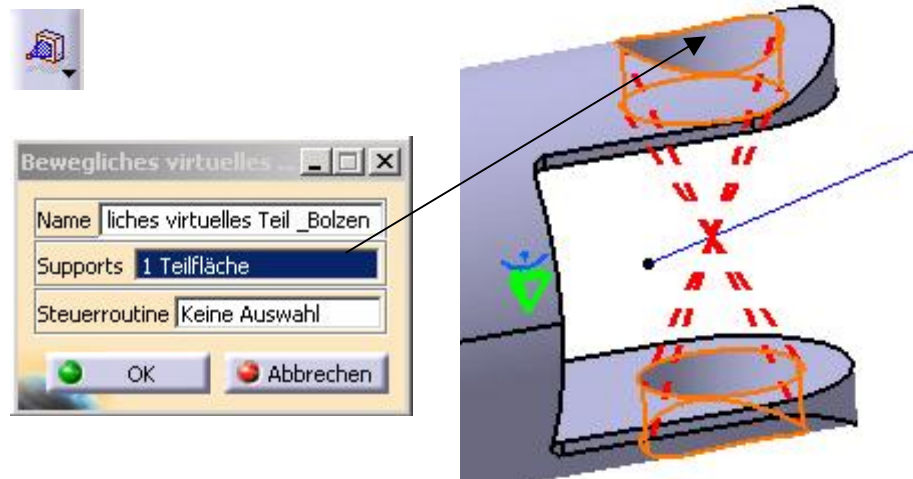
Kardangelenks-
wellenschaft



Sie können dazu die Datei '*Kardangelenkschaft.CATPart*' verwenden.

Im ersten Schritt definieren Sie ein bewegliches virtuelles Element, um den Bolzen nachzubilden.

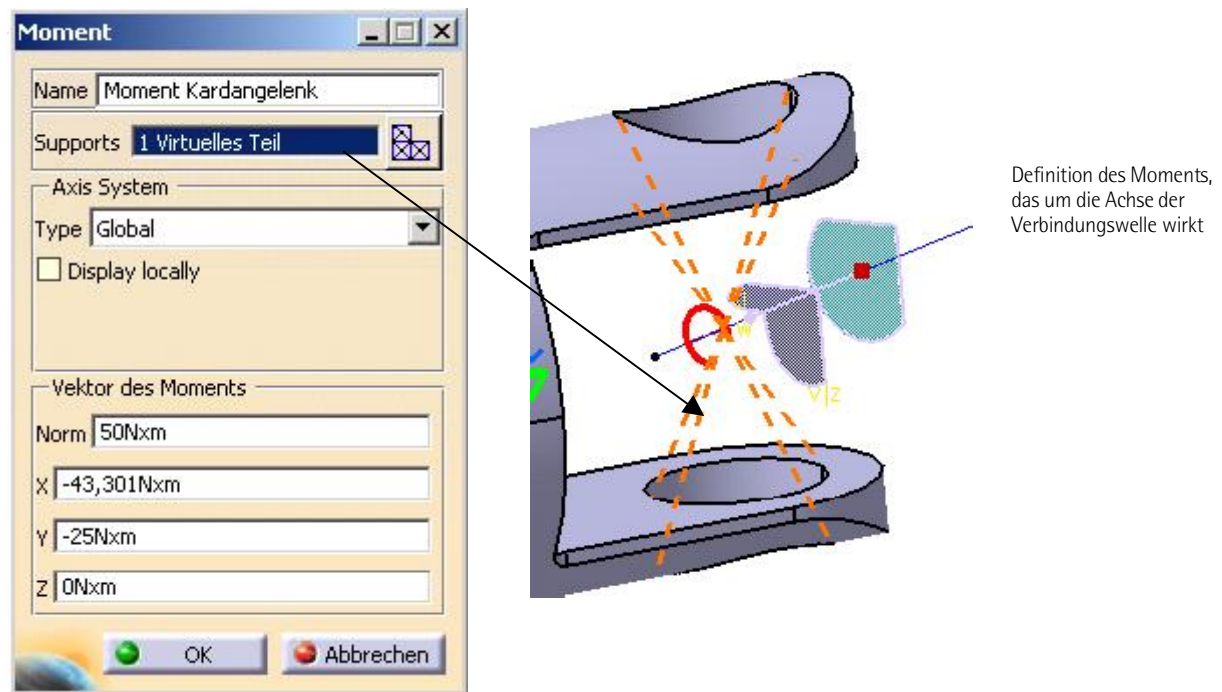
Definition eines
beweglichen virtuel-
len Elements zur
Abbildung des
Bolzens



5.3 Moment

Das Stützelement ist die Mantelfläche der Bolzenbohrung, und die Steueroutine wird automatisch als Zentrum bestimmt.

Um das Moment zu definieren, gehen Sie folgendermaßen vor:

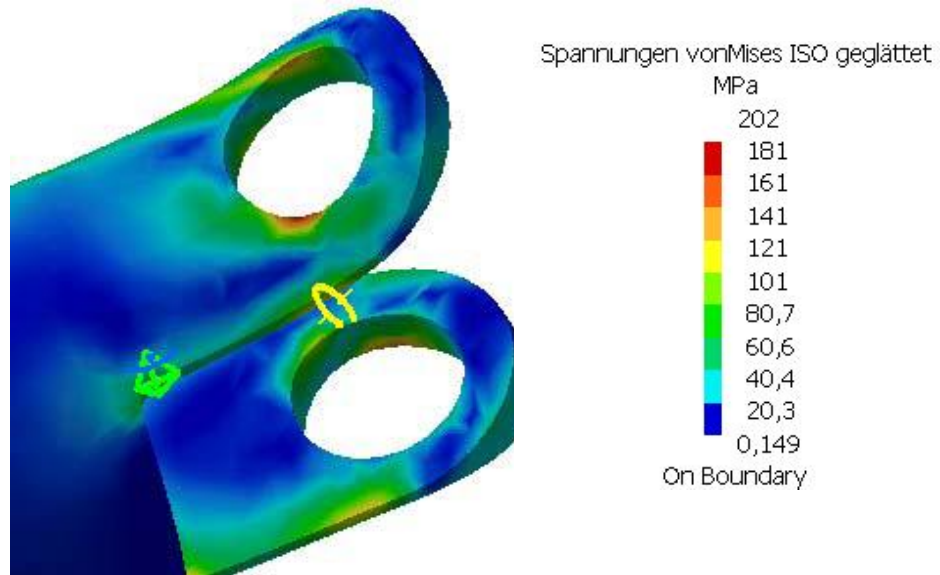


Als Support wählen Sie das zuvor definierte bewegliche virtuelle Element. Geben Sie dann in einer beliebigen Richtung ein Moment von 50Nm ein, und orientieren Sie das Moment mit Hilfe des Kompasses. Die dargestellte Linie symbolisiert die Achse der Verbindungswelle, über die das Moment eingeleitet wird. Bewegen Sie den Kompass genau über diese Achse, um die richtige Wirkungsrichtung des Moments zu erhalten. Das resultierende Moment wird damit in die entsprechenden Richtungen aufgeteilt.

Das Ergebnis der Berechnung erhalten Sie auch mit der Datei 'Kardangelenk_fem.CATAnalysis', und es ergibt folgenden Spannungsverlauf:

5 Definition der Lasteinleitung

Spannungsverlauf
des Kardangelen-
schaftes bei einem
Moment von 50Nm



Die Definition der Randbedingung zur Bauteillagerung können Sie ebenfalls der angeführten Datei entnehmen.

5.4 Lagerlast

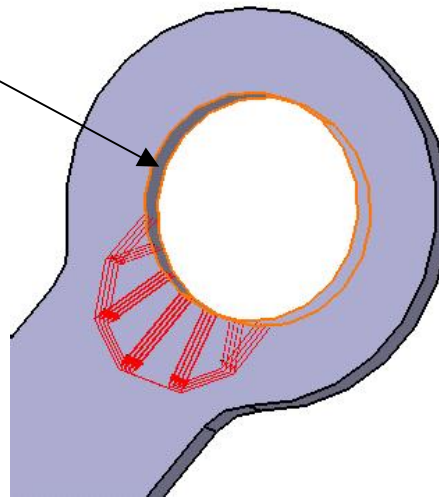
Mit dieser Belastungsart kann die Lastverteilung auf eine zylindrische Lagerfläche wiedergegeben werden. Typisches Anwendungsbeispiel ist die Definition eines Gleitlagers. Als Stützelement kann hier nur eine zylindrische Fläche gewählt werden. Sie sollten die folgende Vorgangsweise einhalten:

Lagerlast



Nach dem Aufrufen des Icons für die Lagerlast ergeben sich einige weitere Eingabemöglichkeiten:

5.5 Importierte Kraft



Definition einer Lagerlast

Es kann wiederum zwischen dem globalen und einem User-Koordinatensystem gewählt werden. Der Kraftvektor lässt sich in drei Richtungen aufteilen und der Winkel, über den die Kraft übertragen wird, entsprechend eingegeben. Die Ausrichtung der Lagerlast ist entweder radial oder parallel zu definieren. Standardmäßig sind zwei Profile, nämlich ein sinusförmiges und ein parabolisches, für eine Verteilung der Lagerlast vorhanden. Über den Eintrag 'Regel' kann jedoch jederzeit eine weitere Gesetzmäßigkeit definiert werden.

Ein ausgeführtes Beispiel zu einer verteilten Lagerlast befindet sich in Kapitel 4.2.4.

5.5 Importierte Kraft

Damit können Sie eine verteilte Last über eine Excel-Tabelle bzw. über eine Text-Datei einlesen. Es kann dabei das globale Koordinatensystem oder ein User-Koordinatensystem verwendet werden. Für jeden Punkt, der in der Tabelle definiert ist, wird die Kraft auf die drei nächstliegenden Knoten verteilt. Treffen die Koordinaten einen Knoten exakt, wird die Kraft direkt auf diesen Knoten aufgebracht.

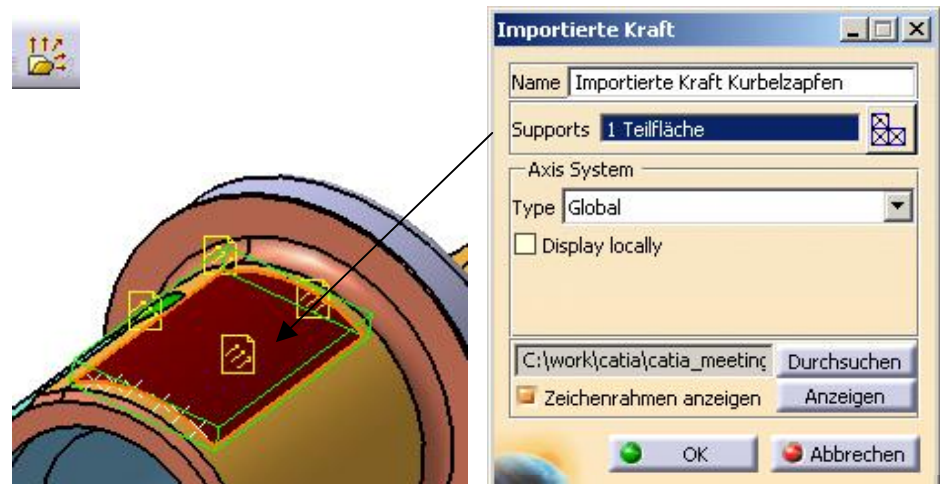
5 Definition der Lasteinleitung

Wichtig ist, dass in der ersten Zeile der Tabelle sowohl die Einheit für die Koordinaten als auch für die Kraft in runder Klammer definiert wird. Die Tabelle muss über genau sechs Spalten verfügen, die Anzahl der angeführten Zeilen ist beliebig. Beispielhaft kann eine Tabelle zur Definition einer importierten Last folgendes Aussehen haben:

A	B	C	D	E	F
x(mm)	y(mm)	z(mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)
-14,2	0	-18,4	0	0	700
-14,2	3,496	-17,456	0	0	0
-14,2	-3,496	-17,456	0	0	0
-14,2	2,598	-17,893	0	0	102
-14,2	1,645	-18,195	0	0	350
-14,2	0,66	-18,36	0	0	598

Bei der Definition der importierten Kraft ist zuerst das dazugehörige Icon aufzurufen:

Definition einer importierten Kraft über eine Excel-Tabelle



Beim Eingabefeld für das Stützelement ist die entsprechende Fläche zu wählen. Nach Auswahl des Koordinatensystems ist über das Feld 'Durchsuchen' die entsprechende Excel- oder Text-Datei zuzuordnen. Die Auswahl 'Zeichenrahmen anzeigen' ermöglicht es zu überprüfen, ob die Koordinaten auch richtig definiert und zugeordnet wurden.

5.6 Importiertes Moment

Die importierte Kraft kann sowohl für eine Fläche als auch für ein virtuelles Element definiert werden.

Wie schon bei der verteilten Kraft handelt es sich auch hier um eine Knotenkraft, was wiederum zu unerwünschten Spannungsüberhöhungen an jenen Knoten führt, an denen die Kräfte angreifen.

5.6 Importiertes Moment

Damit kann eine Momentenverteilung anhand einer Excel- bzw. Text-Datei eingelesen werden. Als Stützelement ist hier jedoch nur die Fläche zulässig. Auch hier wird für jeden Punkt der eingelesenen Tabelle das entsprechende Moment auf die drei nächstgelegenen Knoten verteilt.

Nach Aufruf des entsprechenden Icons hat man die gleichen Eingabemöglichkeiten wie bei der importierten Kraft.



Icon für Importiertes Moment

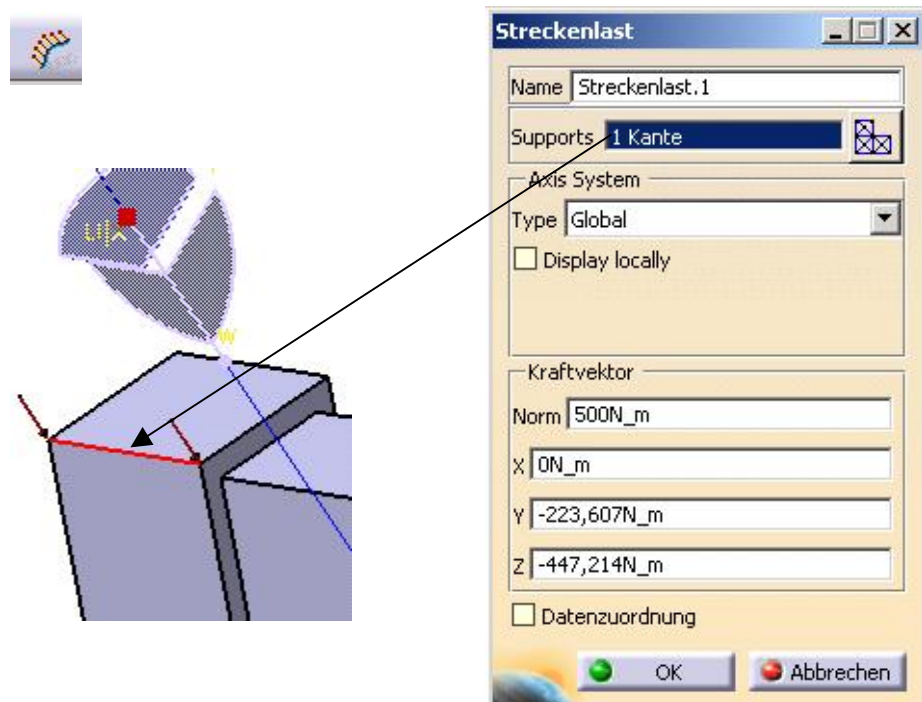
Nach Selektion der Stützfläche und des Koordinatensystems kann die gewünschte Tabelle zugeordnet werden. Die Tabelle muss über genau sechs Spalten verfügen, und die Einheiten müssen in der ersten Zeile in Klammern angegeben werden. Das Moment wird standardmäßig in Newtonmeter (Nxm) in die Tabelle eingegeben.

5.7 Streckenlast

Dieser Befehl ermöglicht die Definition einer Streckenbelastung entlang einer Kante bzw. einer Kurve. Die Standardeinheit für diese Belastung ist N/m und der Kraftvektor kann in drei Richtungen aufgeteilt werden. Bei der Definition einer Streckenlast sind folgende Schritte zu durchlaufen:

5 Definition der Lasteinleitung

Definition einer Streckenlast und Ausrichtung mit Hilfe des Kompasses



Im Eingabefenster ist die gewünschte Kante zu selektieren und das Koordinatensystem zu bestimmen. Danach kann der Wert der Belastung eingegeben und mit dem Kompass orientiert werden, womit das System automatisch die Komponenten in den drei möglichen Richtungen berechnet. Falls 'Datenzuordnung' selektiert wird, kann man die Verteilung der Linienlast über eine Excel-Tabelle bestimmen.

5.8 Flächenlast

Damit kann die gleichmäßige Belastung einer Fläche definiert werden. Als Stützelement kommen hier nur Flächen in Frage, wobei die Standardeinheit dieser Belastung N/m^2 beträgt bzw., falls für den Druck in den Einstellungen so definiert, auch Megapascal (MPa).

Das Ansetzen dieser Last erfolgt auf folgende Weise:

5.8 Flächenlast

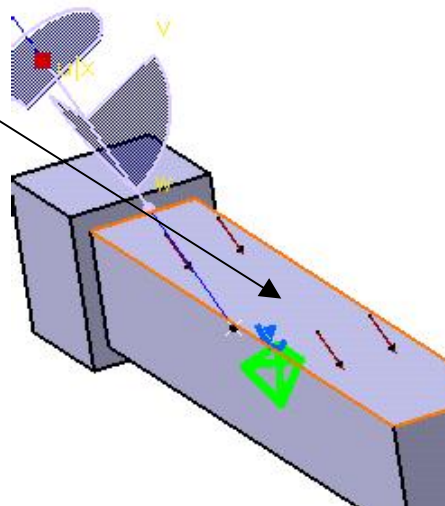


Icon zur Definition
einer Flächenlast

Nach Aufruf des entsprechenden Icons erscheint ein weiteres Eingabefenster:

The 'Flächenlast' dialog box is shown with the following fields and options:

- Name: Flächenlast.1
- Supports: 1 Teilfläche
- Axis System: Type: Global, ☐ Display locally
- Kraftvektor: Norm: 20MPa, X: 0MPa, Y: -8,944MPa, Z: -17,889MPa
- ☐ Datenzuordnung
- Buttons: OK, Abbrechen



Vorgangsweise bei
der Definition einer
Flächenlast

Zuerst definiert man die Supportfläche und das Koordinatensystem. Dann wird der Kraftvektor in einer beliebigen Richtung eingegeben und mit dem Kompass ausgerichtet. Mit der Auswahl der Option der Datenzuordnung kann auch eine Verteilung aus einer Excel-Tabelle eingelesen werden. In diesem Fall besteht die Tabelle nur aus vier Spalten, wobei die ersten drei die entsprechenden Koordinaten definieren und in der vierten Spalte ein Koeffizient (Vielfaches) des eingegebenen Kraftvektors steht. Diese Tabelle kann somit wie im nachstehend angeführten Bild aussehen:

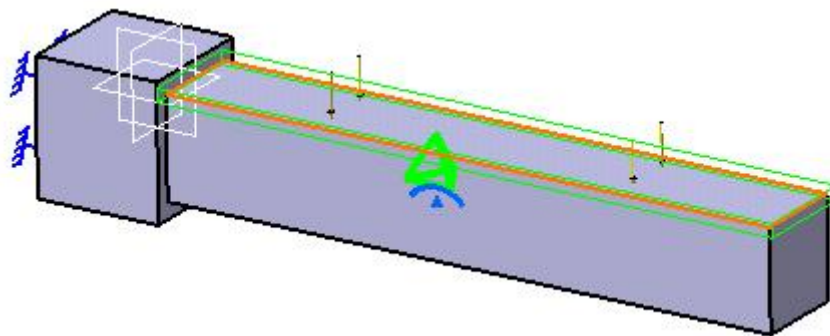
5 Definition der Lasteinleitung

Tabelle zur Definition
eines Lastprofils

A	B	C	D
X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Koeff.()
0	2,5	2,5	1
-10	2,5	2,5	2
-20	2,5	2,5	3
-30	2,5	2,5	4
-40	2,5	2,5	4
-50	2,5	2,5	4
-60	2,5	2,5	5
-70	2,5	2,5	5
-80	2,5	2,5	5
-90	2,5	2,5	6
-100	2,5	2,5	6

Das weitere Vorgehen entspricht jenem in Kapitel 5.5. Es empfiehlt sich jedoch immer, sich den Zeichenrahmen anzeigen zu lassen, um eine korrekte Zuordnung der Koordinaten zu überprüfen.

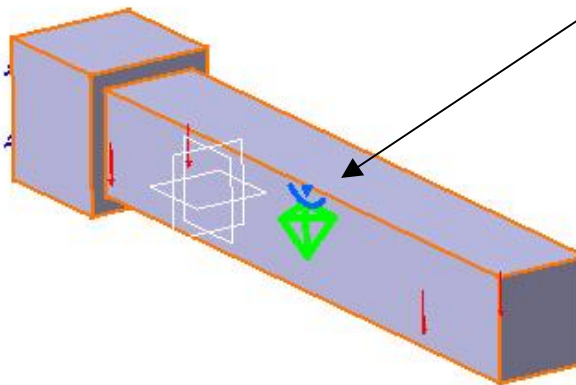
Option 'Zeichenrahmen
anzeigen', um die richtige
Zuordnung zu prüfen



5.9 Körperkraft

Mit diesem Befehl können auf Volumskörper Belastungen definiert werden. Als Stützelemente dienen in diesem Fall Körper sowie Netzteile. Die Standardeinheit für die Körperkraft ist N/m^3 . Gehen Sie bei der Definition wie folgt vor:

5.10 Dichte der Kraft



Körperkraft

Name: Körperkraft.1

Supports: 1 Körper

Axis System

Type: Global

☐ Display locally

Kraftvektor

Norm: 500000N_m3

X: 0N_m3

Y: 0N_m3

Z: -500000N_m3

☐ Datenzuordnung

OK Abbrechen

Definition einer Körperkraft

Nach der Definition des Supports wählt man das Koordinatensystem und gibt die Größe des Kraftvektors ein. Nachdem es sich hier beim Stützelement immer um Körper handelt, können kartesische, zylindrische und sphärische Koordinatensysteme verwendet werden. Auch bei diesem Befehl ist die Zuordnung einer Lastverteilung über eine Excel-Tabelle möglich.

5.10 Dichte der Kraft

Dieser Befehl ermöglicht es, eine verteilte Last auf eine Linie, auf eine Fläche oder auf einen Körper zu definieren, wobei CATIA-Fem die äquivalente Belastung automatisch errechnet. Die Einheit der Kraftdichte ist aus diesem Grund immer Newton (N). Folgende Geometrien können selektiert werden:

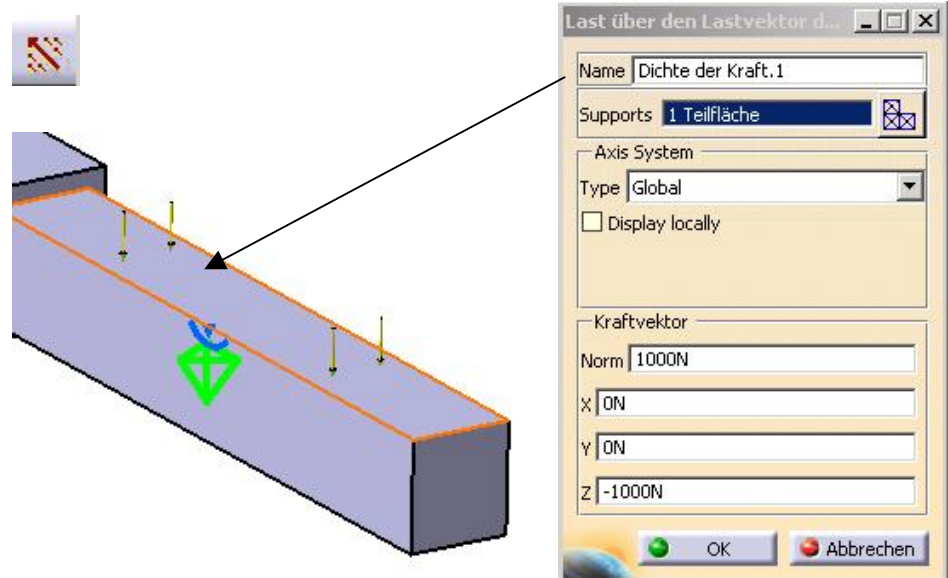
Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid or Surface)	Group		

Wählbare Geometrien bei der Dichte der Kraft

5 Definition der Lasteinleitung

Die Definition der Kraftdichte startet mit dem Aufruf des entsprechenden Icons:

Vorgangsweise bei der Definition der Dichte der Kraft



Im Eingabefeld für den Kraftvektor ist die gewünschte Summenlast anzusetzen, die dann gleichmäßig auf das gewählte Stützelement verteilt wird. Mit Hilfe des Kompasses kann der Vektor in die entsprechende Richtung orientiert werden.

Der Vorteil dieser Randbedingung besteht darin, dass ein eventuell notwendiges Umrechnen der Belastung auf das Bezugselement automatisch ausgeführt wird.

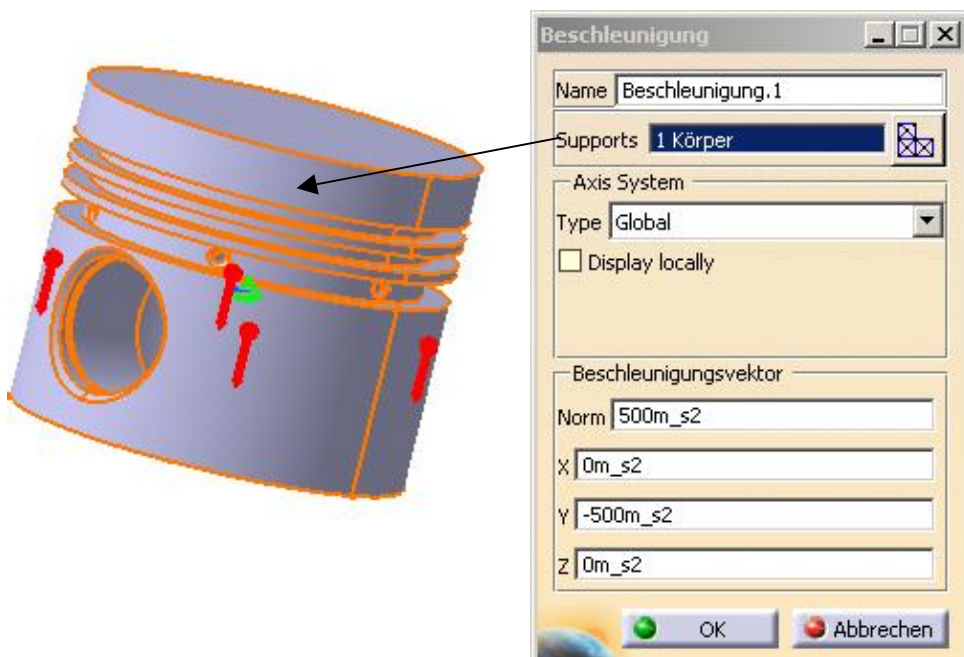
5.11 Beschleunigung

Mit diesem Befehl können Beschleunigungskräfte auf einen Körper aufgebracht werden. Als Stützelement sind in diesem Fall Bauteile bzw. Netzteile zu wählen. Die Standardeinheit für die Beschleunigung ist m/s^2 . Um eine Beschleunigung auf einen Bauteil aufzubringen, geht man folgendermaßen vor:

Icon zur Vergabe einer Beschleunigung



Beschleunigung



Definition der Beschleunigungskraft auf einen Bauteil

Nach der Auswahl des Supports kann der Beschleunigungsvektor entweder entsprechend eingegeben oder mit dem Kompass ausgerichtet werden. Dies ist sowohl im globalen als auch in einem User-Koordinatensystem möglich.

5.12 Rotation

Damit können Belastungen, die aufgrund der Fliehkräfte entstehen, auf einen Bauteil aufgebracht werden. Dies sind zum Beispiel quasistatische Belastungen aufgrund einer Rotationsbewegung bei sich drehenden Bauteilen. Als Stützelemente kommen Körper sowie Netzteile (bei Baugruppen) in Betracht. Die Standardeinheit der Rotationsbewegung (Drehzahl) sind Umdrehungen pro Minute (turn_min), die der Winkelbeschleunigung Radiant pro Sekunde zum Quadrat (rad_s2). Wichtig ist weiters, dass bei der Definition der Lagerungsbedingungen des Bauteils dieses als quasistatisch zu definieren ist. Die Vorgangsweise bei der Definition einer Rotationskraft ist den unten stehenden Abbildungen zu entnehmen:

5 Definition der Lasteinleitung



Im angeführten Beispiel ist die Rotationsbelastung einer Sechskantschraube auf einem Schwungrad zu ermitteln. Das Supportelement ist die Schraube und als Rotationsachse ist die konstruierte Achse des Schwungrads zu selektieren. Daraufhin sind die Werte für die Winkelgeschwindigkeit sowie die Winkelbeschleunigung einzugeben. Als Randbedingung zur Bauteillagerung wird eine isostatische Lagerung (Schraube ist gleichsam mitrotierender Beobachter) gewählt.

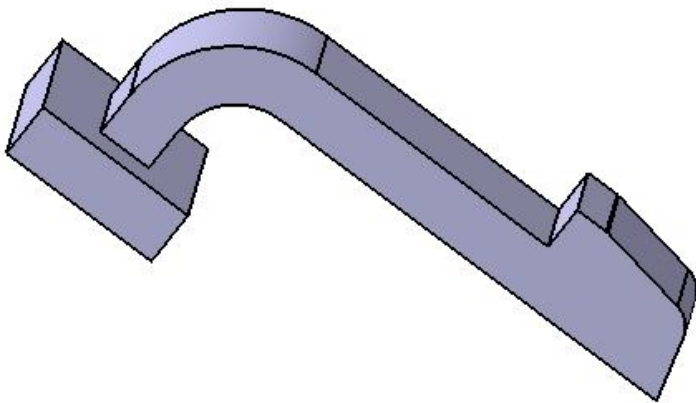
Ein typisches Ergebnis einer solchen FEM-Analyse zeigt das Bild der auftretenden Bauteilverformungen:



5.13 Erzwungene Verschiebung

Damit ist eine Analyse des Strukturverhaltens unter Berücksichtigung einer erzwungenen Verschiebung oder einer erzwungenen Verdrehung möglich. Die erzwungene Verschiebung kann stets nur auf eine Randbedingung zur Bauteillagerung angewendet werden, wobei die Verschiebung bzw. die Rotation in die gewünschte Richtung eingeschränkt werden muss. In diesem Fall ist es oft hilfreich, mit einem lokalen benutzerdefinierten Koordinatensystem zu arbeiten, um Verschiebungen in eine vorgegebene Richtung definieren zu können. Wichtig ist im Weiteren eine genaue und realitätsgetreue Abbildung der Randbedingungen zur Bauteillagerung, um eine ungewollte Versteifung der Struktur zu vermeiden.

Das angeführte Beispiel soll die Vorgangsweise bei der Definition einer erzwungenen Verschiebung erläutern. Starten Sie mit der Datei '*Verschluss.CATPart*'. Es handelt sich dabei um einen Verschlusskasten, der in einer entsprechenden Ausnehmung einrastet, wozu eine Verschiebung von einem Millimeter notwendig ist.

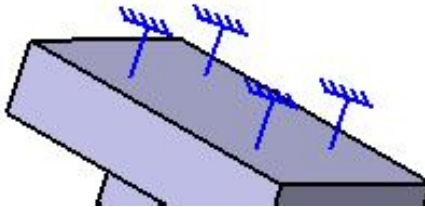


Verschlusskasten

Da bereits ein Material zugeordnet ist, können Sie die GPS-Arbeitsumgebung starten. Beginnen Sie mit den Randbedingungen der Lagerung. Der Kasten ist an einer Fläche fix eingespannt:

5 Definition der Lasteinleitung

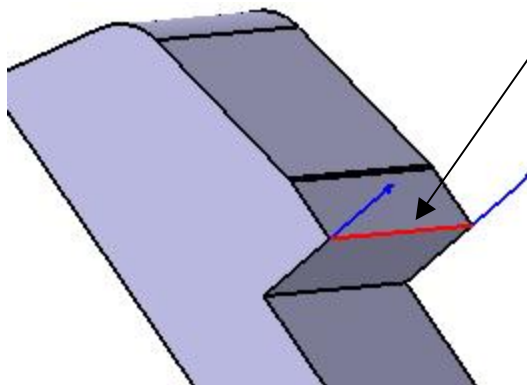
Feste Einspannung des Verschlusshakens



Danach wird mit der erweiterten Bedingung die Verschiebung der einrastenden Kante in einer Richtung gesperrt.



Definition einer erweiterten Bedingung für die Kante des Einrastmechanismus



Erweiterte Randbedingung

Name: Einschränkung.1

Supports: 1 Kante

Axis System: Global

Type: Global

☐ Display locally

☒ Einschränkung für 1. Verschiebung erzeugen

☐ Einschränkung für 2. Verschiebung erzeugen

☐ Einschränkung für 3. Verschiebung erzeugen

☐ Einschränkung für 1. Rotation erzeugen

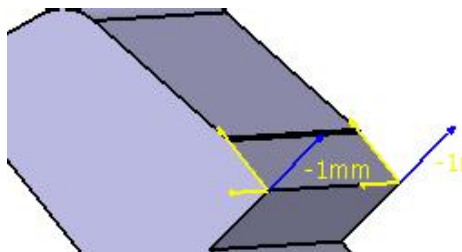
☐ Einschränkung für 2. Rotation erzeugen

☐ Einschränkung für 3. Rotation erzeugen

OK Abbrechen

Anschließend können Sie die erzwungene Verschiebung in der zuvor gesperrten Richtung um einen Millimeter erzeugen:

Definition der erzwungenen Verschiebung von einem Millimeter



Erzwungene Verschiebung

Name: Erzwungene Verschiebung.1

Einschränkung: Einschränkung.1

1. Verschiebung: -1mm

2. Verschiebung: 0mm

3. Verschiebung: 0mm

1. Rotation: 0deg

2. Rotation: 0deg

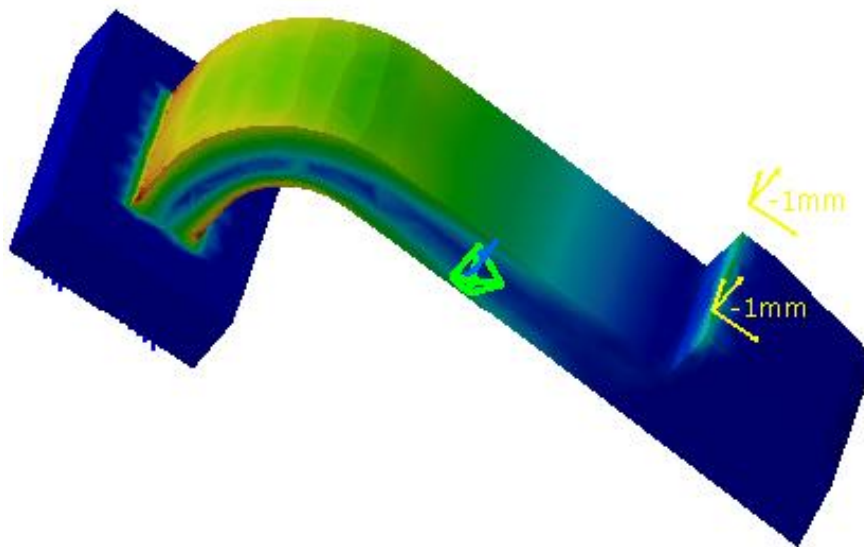
3. Rotation: 0deg

OK Abbrechen

5.13 Erzwungene Verschiebung

Im Eingabefeld für die Einschränkung ist die zuvor definierte erweiterte Bedingung entweder im Zeichenbereich oder im Strukturbaum zu selektieren. Nun geben Sie für die 1.Verschiebung den Wert von 1mm ein.

Das Ergebnis nach der Definition aller Randbedingungen erhalten Sie auch mit der Datei '*Verschluss_erzwungene_verschiebung.CATAnalysis*'. Jetzt kann die Berechnung durchgeführt werden. Prüfen Sie nach einem ersten Rechenschritt mit linearen Elementen die Plausibilität des Ergebnisses und verfeinern Sie anschließend das Netz. Eine Auswertung mit parabolischen Tetraeder-Elementen und einem globalen adaptiven Fehler kleiner als 10% ergibt folgende Spannungsverteilung:



Spannungsverlauf
des Verschlussakens
bei Berechnung mit
TE10-Elementen

Der Spannungsverlauf zeigt einen charakteristischen Zugbereich an der Oberseite und einen Druckbereich an der Unterseite des Verschlussakens.

Die Definition einer erzwungenen Verdrehung erfolgt vollkommen analog zur Verschiebung, wobei die Rotation um die gewünschte Achse mit einer erweiterten Bedingung gesperrt werden muss.

5 Definition der Lasteinleitung

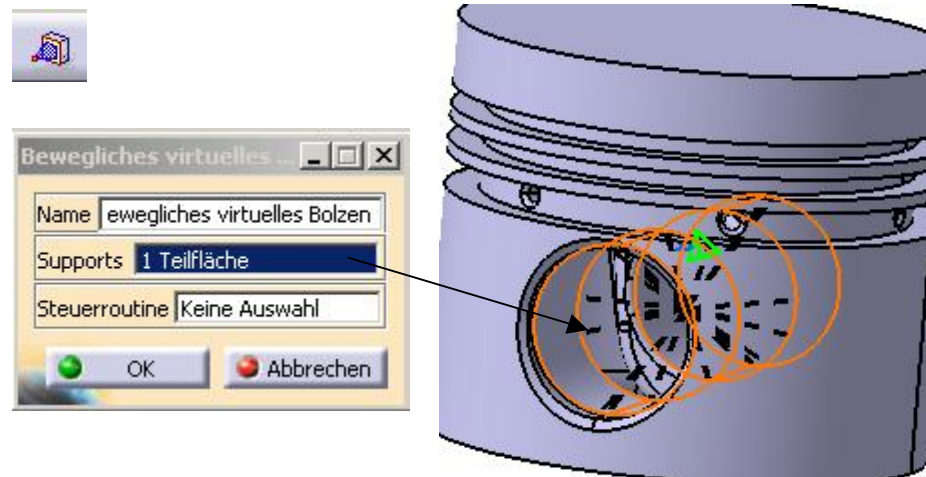
5.14 Temperaturfeld

Dieser Befehl ermöglicht die Definition einer Temperaturbelastung für einen Bauteil. Stützelement ist in diesem Fall ein Volumskörper oder ein Netzteil (bei Baugruppenanalysen). Die Standardeinheit für die Temperatur ist Kelvin (Kdeg). Eine Temperaturbelastung kann nur dann berechnet werden, wenn in den Analyseigenschaften des zugeordneten Materials der Wärmeausdehnungskoeffizient definiert wurde. Dieser wird in der Einheit (mm/mmK) eingegeben. Wichtig ist hier das Zuordnen einer entsprechenden Temperaturverteilung über eine Excel-Tabelle.

Im folgenden Beispiel einer Temperaturbelastung eines Kolbens während des Verbrennungsvorgangs (gemäß angeführter Abbildung) sollen die Spannungen sowie die auftretenden Verformungen analysiert werden.

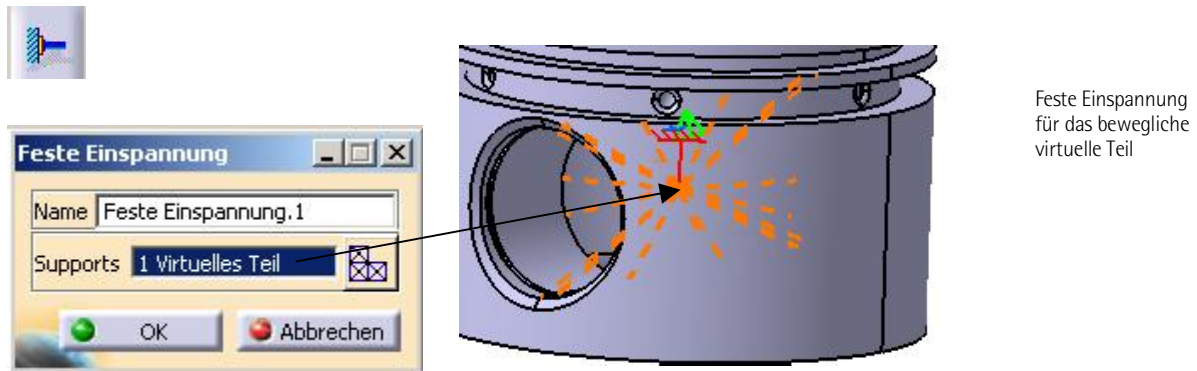
Öffnen Sie als ersten Schritt die Datei *'Kolben.CATPart'*. In diesem Fall handelt es sich um einen Aluminiumkolben, und der Wärmeausdehnungskoeffizient ist mit 0,0000236mm/mmK festgelegt. Die Lagerung des Kolbens wird über ein bewegliches virtuelles Element, welches den Kolbenbolzen nachzubilden soll, abgebildet. Dieses virtuelle Element wird im Weiteren als fest eingespannt definiert. Gehen Sie wie folgt vor:

Definition eines beweglichen virtuellen Teils, um den Kolbenbolzen nachzubilden



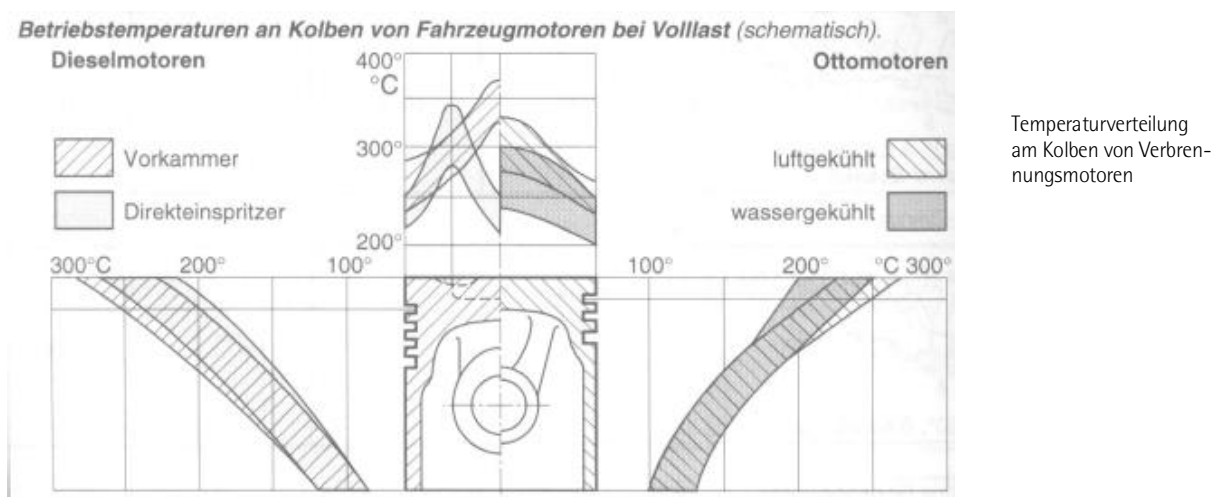
Die Supportfläche ist hier die Mantelfläche der Bolzenbohrung, die Steueroutine wird automatisch als Zentrum bestimmt. Im nächsten Schritt bestimmen Sie die feste Einspannung dieses virtuellen Elements:

5.14 Temperaturfeld



Beim Stützelement (Support) selektieren Sie das zuvor bestimmte virtuelle Teil, wodurch die Lagerung nunmehr definiert ist.

Die Temperaturbelastung des Kolbens zeigt beim Verbrennungsvorgang folgenden gemessenen Verlauf:



Diese Temperaturverteilung ist nun in einer Excel-Tabelle abzubilden, die dann über eine Datenzuordnung eingelesen werden kann. Die Tabelle ist in der Datei 'Temperatur.xls' gespeichert und enthält nachstehende Daten:

5 Definition der Lasteinleitung

Excel-Tabelle zur Zuordnung der Temperaturverteilung eines Kolbens

A	B	C	D
x(mm)	y(mm)	z(mm)	Koeff()
0	60	0	650
36,5	60	0	550
0	60	36,5	550
-36,5	60	0	550
0	60	-36,5	550
0	0	0	400
36,5	0	0	415
0	0	36,5	415
-36,5	0	0	415
0	0	-36,5	415
0	40	0	450
36,5	40	0	450
0	40	36,5	450
-36,5	40	0	450
0	40	-36,5	450
18	60	18	575
-18	60	-18	575
-18	60	18	575
18	60	-18	575

Die erste Zeile der Tabelle enthält die Koordinaten und in runder Klammer die zu verwendende Einheit. Die vierte Spalte der Tabelle enthält einen Koeffizienten, der dimensionslos ist und das Vielfache der Ausgangstemperatur (am besten mit 1 Kelvin anzusetzen) enthält.

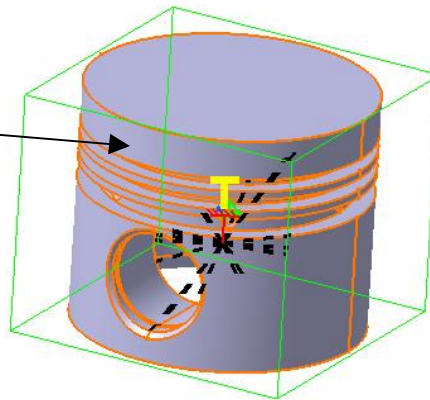
Im nächsten Schritt definieren Sie die Temperaturbelastung für den betrachteten Kolben. Dazu ist wieder das entsprechende Icon 'Temperatur' aufzurufen:

Icon für Temperaturbelastung



Danach erscheint ein weiteres Eingabefenster:

5.14 Temperaturfeld



Definition einer Temperaturbelastung des Kolbens

Vergeben Sie einen entsprechenden Namen für die Temperaturbelastung und wählen Sie den Kolben als Stützelement. Im Feld 'Temperatur' geben Sie 1Kdeg ein. Es empfiehlt sich stets 1Kelvin als Startwert einzugeben, da die Zuordnung über den Koeffizienten der obenstehenden Tabelle somit leichter nachvollziehbar wird. Falls die Temperatur jedoch über den gesamten Bauteil konstant ist, wird in diesem Feld der entsprechende Wert eingegeben. Die Option 'Zeichenrahmen anzeigen' dient wiederum der Kontrolle, ob die Koordinaten der Tabelle dem Bauteil richtig zugeordnet wurden. Der Rahmen des Quaders sollte im Falle einer Temperaturbelastung den gesamten Teil umschreiben. Es ist auch möglich, mit 'Anzeigen' die zugeordnete Tabelle zu visualisieren.

Sobald die Temperaturbelastung definiert ist, erscheint im Strukturbaum unter Umgebung die Möglichkeit, eine Anfangstemperatur einzugeben. Dazu müssen Sie im Strukturbaum auf 'Umgebung.1' doppelklicken.



Bestimmung der Anfangstemperatur

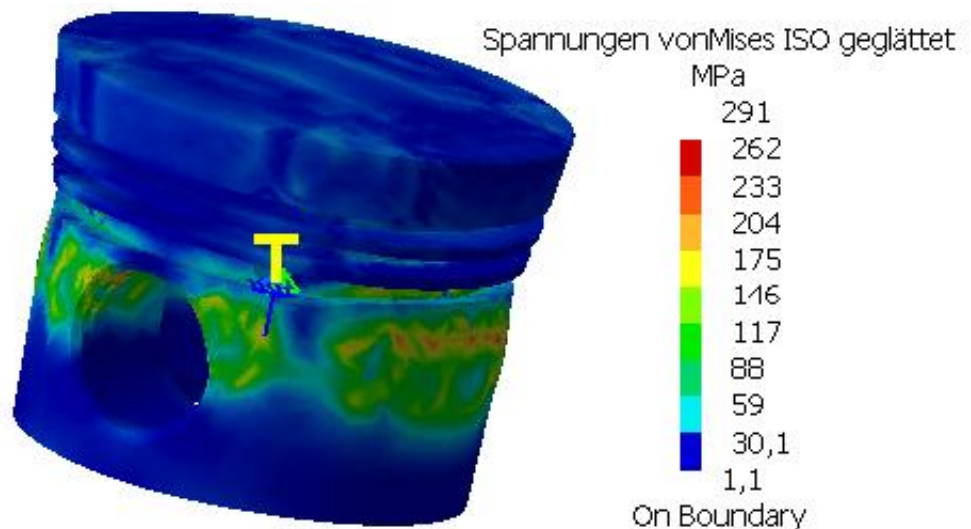
5 Definition der Lasteinleitung

In diesem Fall sollte die Anfangstemperatur auf den niedrigsten Wert der Temperaturverteilung, nämlich 400 Kelvin, gesetzt werden.

Nach der Zuordnung all dieser Randbedingungen kann eine erste Berechnung gestartet werden. Sie können dies auch direkt mit der Datei *Kolben_temperatur.CATAnalysis* tun. Darauf ist die Vernetzung mit parabolischen Tetraeder-Elementen durchzuführen und eine neuerliche Berechnung zu starten.

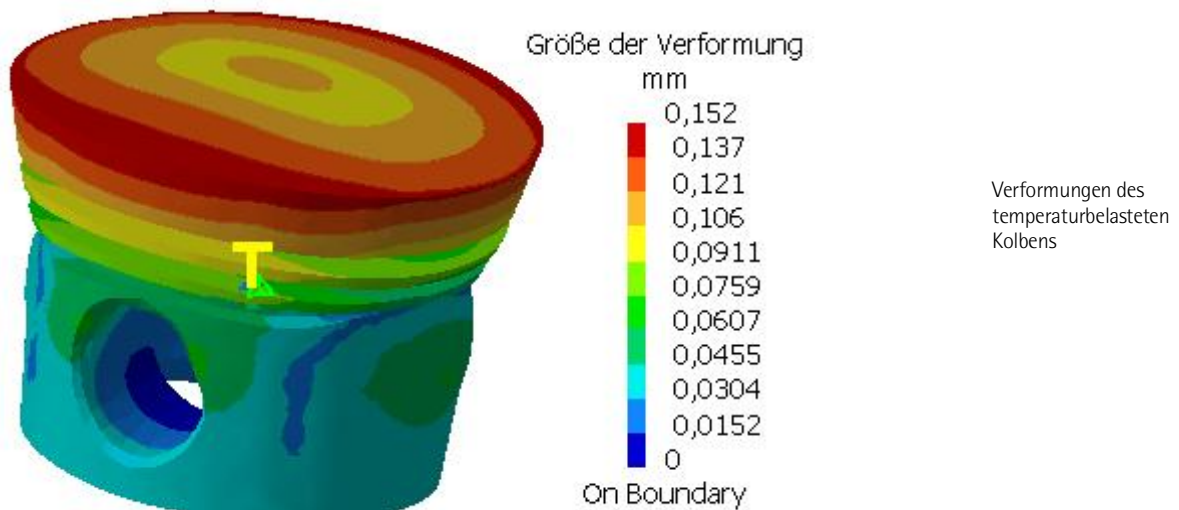
Die Analyse des Spannungsverlaufs zeigt die für den Kolben einer Verbrennungskraftmaschine typische Verteilung, wobei die höchsten auftretenden Spannungen im Bereich von ca. 290N/mm^2 liegen.

Spannungsverteilung
bei einem
temperaturbelasteten
Kolben eines
Verbrennungsmotors



Die Verformungen des Kolbens unter dieser Temperaturbelastung zeigen deutlich einen elliptischen Verlauf im Bereich des Kolbenbodens. Im Weiteren verformt sich der Kolbenboden wesentlich stärker als die Mantelfläche unterhalb der Ölabbstreifringe. Dies führt in der Praxis dazu, dass das Schliffbild des Kolbens leicht ballig und konisch ausgeführt wird.

5.15 Zusammenfassende Übersicht

















Die größten Verformungen am Kolbenboden liegen im Bereich von 150µm. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird der Kolben entsprechend geschliffen, um unter der Temperaturbelastung eine möglichst zylindrische Form zu erreichen.

5.15 Zusammenfassende Übersicht

Abschließend findet sich in der abgebildeten Tabelle eine Übersicht sämtlicher Möglichkeiten zur Lasteinleitung. Man findet zu jedem Icon die entsprechende Bezeichnung, die Möglichkeiten zur Auswahl von Stützelementen (Support) sowie die in der GPS-Arbeitsumgebung standardmäßig verwendeten Einheiten. Bei der Einheit für den Druck empfiehlt es sich, wie schon erwähnt, von N/m^2 auf MPa (entspricht N/mm^2) umzustellen, um die Spannungen ebenfalls in der für FEM-Analysen gängigen Einheit MPa ausgewiesen zu erhalten.

5 Definition der Lasteinleitung

Übersicht der unterschiedlichen Lastvarianten

Lastart	Icon	Stützelement				Standardeinheit in CATIA
		Kante	Fläche	Körper	Virtuelles Teil	
Druck			X			MPa (N/m ²)
Verteilte Last		X	X		X	N
Moment		X	X		X	Nm
Lagerlast			X			N
Importierte Kraft			X		X	N
Importiertes Moment			X		X	Nm
Steckenlast		X				N/m
Flächenlast			X			N/m ²
Körperkraft				X		N/m ³
Dichte der Kraft		X	X	X		N
Beschleunigung				X		m/sec ²
Rotation				X		rad/sec ²
Erzwungene Verschiebung		Randbedingungen der Bauteillagerung				mm
Temperaturfeld				X		Kelvin

6 Durchführung der Berechnungen

Nach der Definition der Randbedingungen zur Bauteillagerung sowie zur Lastaufbringung kann mit der eigentlichen FEM-Analyse in der Arbeitsumgebung GPS begonnen werden.

Eine genaue Beschreibung der zur Verfügung stehenden finiten Elemente und deren Anwendung findet sich im Kapitel 8. Standardmäßig wird in der Arbeitsumgebung GPS eine automatische Vernetzung mit Tetraeder-Elementen durchgeführt.

6.1 Erster Rechenschritt

Zum Starten einer erstmaligen Berechnung rufen Sie folgendes Icon auf:



Berechnen

Daraufhin erscheint folgendes Fenster:



Auswahlmöglichkeiten
vor der Durchführung
einer FEM-Berechnung

Im Pulldown-Menü ist die Einstellung 'All' zu wählen, die ohnehin standardmäßig vorgeschlagen wird. Die weiteren Auswahlmöglichkeiten in diesem Menü sind:

- Mesh only: Es wird nur vernetzt.
- Analysis Case Solution Selection: Auswahl eines bestimmten Analysefalls.
- Selection by Restraint: Auswahl bestimmter Randbedingungen.

6 Durchführung der Berechnungen

Die Einstellung 'Preview' ergibt eine Abschätzung der bei der Berechnung benötigten Systemressourcen. Es handelt sich bei der ausgewiesenen voraussichtlichen Berechnungszeit um eine reine CPU-Zeit, die nicht exakt der tatsächlich benötigten Zeit entspricht. Im Weiteren werden der benötigte Arbeitsspeicher sowie der Speicherbedarf auf der Festplatte abgeschätzt. Durch Selektion von 'Yes' wird dann die Faktorisierung sowie die Lösung der Matrix durchgeführt.

Die Einstellungen bezüglich der Speicherung der Steifigkeitsmatrix, deren Lösung sowie temporärer Files befinden sich im Kapitel 3.5.3 und sind dort nachzuschlagen.

Um den benötigten Speicherplatz in einem vernünftigen Rahmen zu halten (ca. 5 Gigabyte sollten in dem entsprechenden Verzeichnis zur Verfügung stehen), sollten nicht benötigte Daten zyklisch gelöscht werden. Dies geschieht mit dem Icon 'Speicherinhalt löschen'.

Icon zum Löschen
von Berechnungsda-
teien



Dabei gibt es eine weitere Auswahlmöglichkeit, was alles gelöscht werden soll.

Auswahlmöglichkeiten
beim Löschen



Mit der Auswahl von 'Berechnungsdaten löschen' werden die Matrix sowie eventuelle temporäre Dateien gelöscht, die Ergebnisse bleiben jedoch weiterhin verfügbar und können angezeigt werden.

Mit der Selektion von 'Ergebnis- und Berechnungsdaten löschen' werden alle Dateien der FEM-Berechnung, also auch die Ergebnisdateien gelöscht, was dazu führt, dass für eine Ergebnisdarstellung eine neuerliche Berechnung erforderlich ist. Im CATAnalysis-File wird allein das FEM-Netz gespeichert.

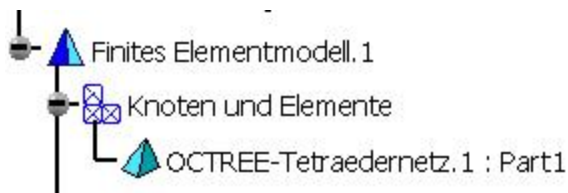
Nach durchgeführter erster Berechnung ist eine Analyse der Ergebnisse vorzunehmen. Falls bei der Faktorisierung Singularitäten festgestellt wurden, sind die Randbedingungen entsprechend zu ergänzen. Daraufhin ist eine qualitative Überprüfung der Spannungsverteilung sowie der Verformungen notwendig. Falls diese Verteilung nicht der Realität entspricht, ist eine Änderung der Randbedingungen erforderlich.

Nach einer ersten FEM-Berechnung ist jedoch keine quantitative Spannungs- bzw. Verformungsaussage möglich.

6.2 Netzverfeinerung und weitere Berechnung

6.2 Netzverfeinerung und weitere Berechnung

Vor der Durchführung eines zweiten Rechenschritts ist eine Netzverfeinerung vorzunehmen. Dies geschieht am einfachsten durch einen Aufruf des OCTREE-Tetraeder-Netzes im Strukturbaum.



Aufruf der Netzeigenschaften

Daraufhin erscheint ein weiteres Eingabefenster zur Definition der Netzeigenschaften:



Definition des verwendeten Tetraeder-Netzes

In der Kartei 'Global' kann für den untersuchten Bauteil eine global gültige Elementgröße sowie ein absoluter Durchhang (SAG-Wert) definiert werden. Der CATIA-Solver wählt selbständig entsprechend der vorhandenen Geometrie und deren Unstetigkeiten eine ökonomische Elementgröße sowie einen SAG-Wert. Der SAG-Wert gibt an, wie genau sich die Elemente an die vorhandene Geometrie anpassen (Sekantenabweichung). Je kleiner der Wert, desto besser kann der Bauteil mit finiten Elementen nachgebildet werden. Der Elementtyp sollte im Falle der Netzverfeinerung immer auf ein parabolisches Element umgestellt werden, was zu einer Vernetzung mit TE10-Elementen führt. Der Unterschied zwischen linearen und

6 Durchführung der Berechnungen

parabolischen Elementen wird im Kapitel 8 genau beschrieben. Diese Umstellung auf parabolische Elemente kann auch mit dem Icon 'Elementtyp' erfolgen:

Icon 'Elementtyp'
und Umstellung
auf parabolische
Elemente



In der Kartei 'Lokal' können die lokale Elementgröße sowie die lokale maximale Abweichung definiert werden. Dazu ist die Auswahl eines Stützelements an der Bauteilgeometrie notwendig:

Kartei 'Lokal' zur De-
finition eines lokalen
FEM-Netzes



Nach getroffener Auswahl erscheint das entsprechende Eingabefenster zur Definition einer lokalen Elementgröße:

6.2 Netzverfeinerung und weitere Berechnung



Eingabefenster zur
Definition der Größe
eines lokalen Netzes

Hier ist die Selektion einer Stützgeometrie, auf welche die Elementgröße angewendet werden soll, sowie die gewünschte Elementgröße im Feld 'Wert' einzugeben. Der eingegebene Wert entspricht der Kantenlänge der Tetraeder-Elemente. Das gleiche Eingabefenster erhält man auch durch Aufruf des Icons 'Größe des lokalen Netzes' in der Symbolleiste 'Netzspezifikationen':



Größe des lokalen Netzes

Icon zur lokalen
Netzgrößendefinition

In ähnlicher Weise wird eine lokale maximale Abweichung (SAG-Wert) definiert.



Definition eines lokalen
SAG-Wertes

Wiederum ist die Angabe eines Supports an der Bauteilgeometrie sowie die Definition des SAG-Wertes erforderlich. Auch hier ist das entsprechende Eingabefenster über die Symbolleiste der Netzspezifikationen mit dem Icon 'Durchhang des lokalen Netzes' aufzurufen:

6 Durchführung der Berechnungen

Icon zur Definition eines lokalen SAG-Wertes



Durchhang des lokalen Netzes

Eine lokale Netzdefinition sollte in kritischen Spannungsbereichen sowie in Bereichen mit hohen Spannungsgradienten erfolgen. Nach dieser Netzverfeinerung, die aus einzelnen der oben beschriebenen Schritte bestehen kann, ist ein neuerlicher Berechnungsvorgang mit dem Icon 'Berechnen' zu starten.

Die Berechnung mit parabolischen Elementen liefert bereits wesentlich genauere Ergebnisse, und eine quantitative Spannungs- und Verformungsaussage ist damit unter Berücksichtigung der globalen Genauigkeit bereits denkbar.

6.3 Überprüfung der Genauigkeit

Um eine quantitative Aussage zu ermöglichen, ist in jedem Fall eine Überprüfung des objektiven Fehlers bei der Berechnung durchzuführen.

Dies erfolgt über eine adaptive Netzverfeinerung mit dem Icon 'Neue Adaptivitätseinheit':

Icon zur Überprüfung des objektiven Fehlers



Neue Adaptivitätseinheit

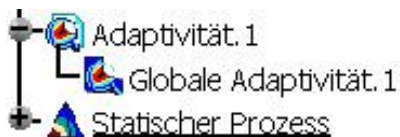
Dazu ist im daraufhin erscheinenden Eingabefenster als Supportelement das entsprechende Tetraedernetz im Strukturbaum zu wählen. Der ELFINI-Solver weist dann automatisch den derzeitigen aktuellen Fehler in Prozent aus. Dieser objektive Fehler sollte, um eine quantitative Spannungs- und Verformungsaussage zu gewährleisten, kleiner als 10% sein. In kritischen Spannungsbereichen sollte der lokale Fehler kleiner als 5% sein. Hier ist die Definition einer lokalen Adaptivität sinnvoll.

6.3 Überprüfung der Genauigkeit



Eingabefenster zur Definition einer adaptiven Netzverfeinerung mit einem objektiven Fehler

Falls der ausgewiesene objektive Fehler bereits unter 5% zu liegen kommt, ist eine weitere Berechnung nicht mehr notwendig. Ansonsten wird über die Eingabe des zu erreichenden objektiven Fehlers eine neue Adaptivität definiert, die auch im Strukturbaum ersichtlich ist:



Eintrag der Adaptivität im Strukturbaum

Es ist auch die Definition einer lokalen Adaptivität für kritische und somit genauer zu untersuchende Spannungsbereiche durchführbar. Dies geschieht durch Aufruf des Kontextmenüs (rechte Maustaste) über den Eintrag 'Globale Adaptivität' und Auswahl von 'Lokale Adaptivität':



Definition einer lokalen Adaptivität mit Selektion eines Stützelements an der Bauteilgeometrie (kritische Stelle)

6 Durchführung der Berechnungen

Eine erneute Berechnung erfolgt nunmehr unter Berücksichtigung dieser adaptiven Netzverfeinerung und wird mit dem Icon 'Mit Adaptivität berechnen' gestartet.



Mit Adaptivität berechnen

Das daraufhin erscheinende zusätzliche Eingabefenster ermöglicht die Definition einiger weiterer Parameter, die für die Durchführung einer neuerlichen Berechnung notwendig sind:

Eingabefenster für die Parameter bei einer Berechnung mit Adaptivität

A screenshot of a Windows-style dialog box titled 'Parameter des Adaptivitätsprozesses'. It contains several input fields and checkboxes. The 'Name' field is set to 'Adaptivität.1'. The 'Anzahl Iterationen' field is set to '2'. There are two unchecked checkboxes: 'Größere Vernetzung zulassen' and 'Globalen Durchhang inaktivieren'. The 'Mindestgröße' field is set to '2mm'. At the bottom, there are 'OK' and 'Abbrechen' buttons.

Im Eingabefeld 'Anzahl der Iterationen' wird definiert, wie viele Rechenschritte durchgeführt werden können, bis das Ergebnis, bei dem der eingegebene maximale globale Fehler unterschritten wird, erreicht ist. Es kann weiters eine gröbere Vernetzung als jene, die in den Einstellungen für das Netz definiert wurde, zugelassen werden. Falls der globale Durchhang inaktiviert wird, wählt der Solver selbstständig einen der Geometrie entsprechenden SAG-Wert. Mit der Mindestgröße kann eine Elementkantenlänge bestimmt werden, die bei den Berechnungsvorgängen nicht unterschritten werden darf.

Es ist bei einer Berechnung mit Adaptivität allerdings zu beachten, dass die benötigten Systemressourcen bedeutend ansteigen und keine Abschätzung dieses Ressourcenbedarfs erfolgt. Solche FEM-Berechnungen sollten nur mit einer leistungsfähigen Hardware durchgeführt werden (Verwendung der Intel-MKL-Library, Prozessor bei PC's mit mindestens 2GHz und einem Arbeitsspeicher von mindestens einem Gigabyte). Außerdem sollte in dem Verzeichnis, in dem die Berechnungsdaten gespeichert werden, ein Platz von ca. 10 Gigabyte vorhanden sein.

6.3 Überprüfung der Genauigkeit

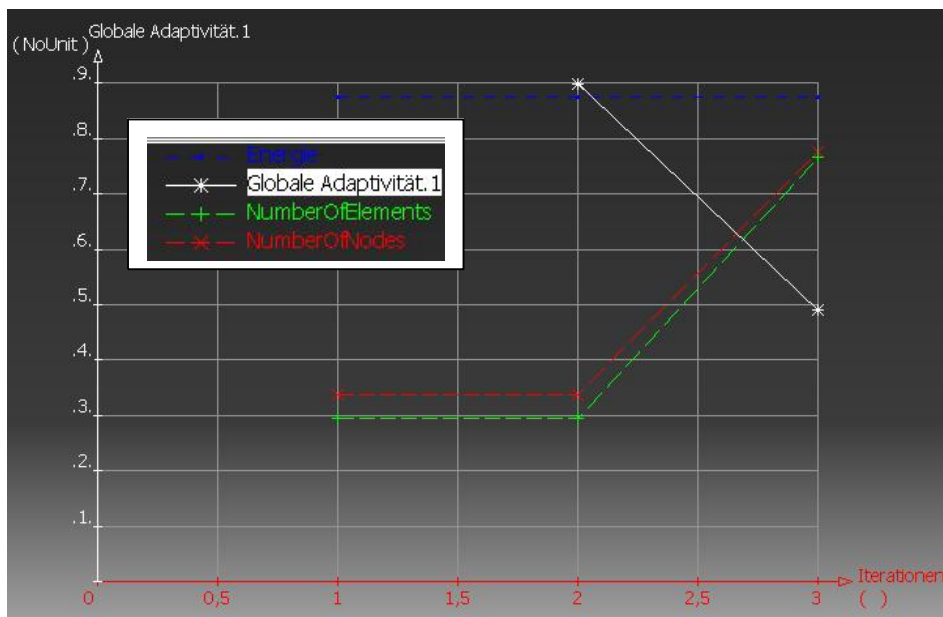
Eine grafische Analyse des Verlaufs des globalen Fehlers sowie der benötigten Elemente und Knoten ist mit folgendem Icon durchführbar:



Protokoll der Berechnungen

Icon zur grafischen Darstellung von objektivem Fehler sowie der benötigten Elemente und Knoten

Nach Aufruf dieses Icons erhält man beispielhaft folgende Grafik:



Grafische Darstellung eines Berechnungsprotokolls bei Verwendung einer Adaptivität

In dieser Grafik ist der Verlauf der globalen Adaptivität über den Iterationsschritten dargestellt. Man sieht, dass die Anzahl der notwendigen Elemente und Knoten, um den vorgegebenen globalen Fehler zu unterschreiten, stark zunimmt. Ausgeführte Beispiele zu diesem Thema finden sich im Kapitel 9.

6 Durchführung der Berechnungen

6.4 Strategien bei der FEM-Analyse

Eine FEM-Analyse ist von vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig, die auch wesentlich die entsprechende Vorgehensweise bei der Berechnung beeinflussen. Einige dieser Einflussfaktoren sind:

- Art der Analyse (Statische Analyse, Frequenzanalyse, Beulprozess usw.)
- Beschaffenheit der Bauteilgeometrie
- Reiner Variantenvergleich als Analyseziel
- Globale Verformungsanalyse
- Lokale Spannungsanalyse

Dennoch kann ein grobes Vorgehenskonzept für eine FEM-Berechnung angegeben werden:

6.4.1 Qualitative Prüfung der Ergebnisse

Ziel dieses Schrittes ist eine Überprüfung der definierten Randbedingungen, es wird mit linearen groben Netzen gerechnet. Hier wird eine rein qualitative Beurteilung der Spannungs- und Verformungszustände hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit der Realität durchgeführt. Durch die Erfahrung des Berechnungsingenieurs werden die Ergebnisse auf ihre Plausibilität überprüft.

Eventuell auftretende Singularitäten sind durch die Definition zusätzlicher Randbedingungen zu beseitigen. Eine Spannungsaussage ist in dieser Phase der Analyse nicht möglich, jedoch können Tendenzen der Verformung festgestellt werden.

6.4.2 Variantenvergleich bei verfeinertem Netz

In einem zweiten Rechenschritt wird ein parabolisches Netz verwendet, wobei auch eine Netzverfeinerung durchgeführt wird. Nun sind bereits quantitative Verformungsaussagen möglich, und für einen Vergleich unterschiedlicher Bauteilvarianten ist eine Tendenz der auftretenden Spannungszustände ableitbar. Die globale Genauigkeit sollte dazu allerdings einen Fehler von weniger als 10 % aufweisen.

6.4.3 Lokale Spannungsuntersuchungen

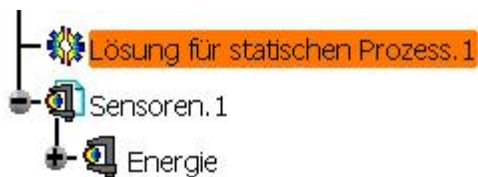
Um lokale Spannungsuntersuchungen durchführen zu können, ist ein lokaler Fehler, der kleiner als 5 % ist, notwendig. Dazu definiert man eine Adaptivität und reduziert den Fehler in mehreren Iterationsschritten. Das dazu verwendete Netz ist an den kritischen Stellen entsprechend verfeinert und besteht aus parabolischen Elementen.

6.5 Berechnungsmethoden im ELFINI-Solver

Nunmehr ist auch eine quantitative Aussage über die Spannungszustände möglich, was aber einen erheblichen Rechenaufwand erfordert.

6.5 Berechnungsmethoden im ELFINI-Solver

Im ELFINI-Solver werden zwei unterschiedliche Methoden zur Lösung der Steifigkeitsmatrix angeboten. Zur Auswahl der entsprechenden Methode wird im Strukturbau ein Doppelklick auf die Lösung des jeweiligen Analyseprozesses durchgeführt:



Berechnungsmethoden aufrufen

Danach erscheint ein Fenster mit der Auswahlmöglichkeit der Verfahren:



Auswahlfenster für die Berechnungsmethode

Grundsätzlich kann zwischen dem Gaußschen Algorithmus und dem Gradientenverfahren unterschieden werden. Standardmäßig wird das Gaußsche Verfahren angewendet.

6 Durchführung der Berechnungen

6.5.1 Der Gauß-Algorithmus

Der vom Mathematiker Gauß entwickelte Algorithmus ermöglicht eine rasche und effiziente Lösung der Steifigkeitsmatrix. Dem Vorteil einer kurzen Berechnungszeit stehen jedoch Nachteile bei den benötigten Ressourcen des Hauptspeichers und der Festplatte gegenüber.

6.5.2 Das Gradientenverfahren

Das Gradientenverfahren ist ein iteratives Rechenverfahren zur Lösung der Steifigkeitsmatrix. Eine Abschätzung der Rechenzeit ist hier nur sehr schwer möglich, jedoch liegt sie höher als beim Gauß-Algorithmus.

Vorteile ergeben sich beim Hauptspeicherbedarf und dem benötigten Platz auf der Festplatte. Bei einer Variation der eingeleiteten Belastung muss allerdings bei diesem Verfahren eine komplette Neuberechnung erfolgen.

Bei der Selektion des Gradientenverfahrens ist eine Angabe der maximalen Iterationsschritte bei der Berechnung erforderlich, die dann nicht überschritten werden darf. Wird der Wert 0 eingegeben, erfolgt die Ermittlung der Iterationsschritte automatisch. Der vorgegebene Wert für die Genauigkeit sollte im Sinne eines verwertbaren Ergebnisses unter einer entsprechenden Berechnungszeit nicht verändert werden.

6.6 Verfügbare FEM-Analysen

Mit dem CATIA-ELFINI Solver können unterschiedliche FEM-Berechnungen durchgeführt werden. Eine Übersicht der möglichen FEM-Analysen zeigt die folgende Aufstellung:



Statischer Prozess



Durch die Statik erzwungene Frequenzen



Frequenzprozess



Beulprozess

6.6 Verfügbare FEM-Analysen



Kombinierter Prozess

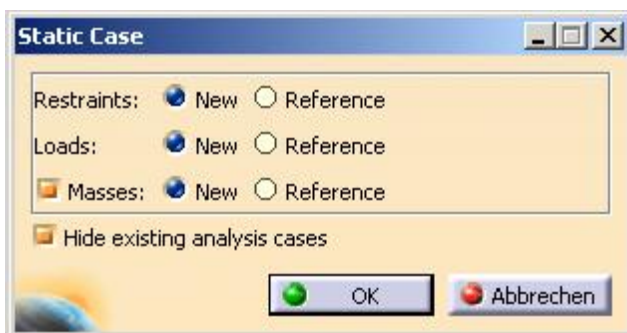


Dynamische Antwort

6.6.1 Statischer Prozess

Den Großteil der in diesem Buch in Kapitel 9 erläuterten Übungsbeispiele stellen statische Analysen dar. Der statische Prozess ist der am häufigsten verwendete Anwendungsfall für FEM-Berechnungen.

Es ist auch möglich, mehrere statische Prozesse in einer CATAnalysis-Datei durchzuführen. Dazu wählt man 'Einfügen' und selektiert daraufhin den statischen Prozess, worauf ein weiteres Auswahlfenster erscheint:



Auswahlfenster für den neu eingefügten statischen Prozess

In diesem Fenster kann definiert werden, ob die bestehenden Randbedingungen als Referenz wiederverwendet werden sollen oder ob neue Randbedingungen angesetzt werden. Dies ist für die Bauteillagerung (Restraints), für die Lastaufbringung (Loads) und für eine etwaige Belastung durch zusätzliche Massen (Masses) möglich. Bei einer Selektion von 'Reference' ist im Strukturbaum der gewünschte Bezug auszuwählen.

Ansonsten ist bei der Berechnung des neu eingefügten statischen Prozesses analog zum eben beschriebenen Ablauf vorzugehen.

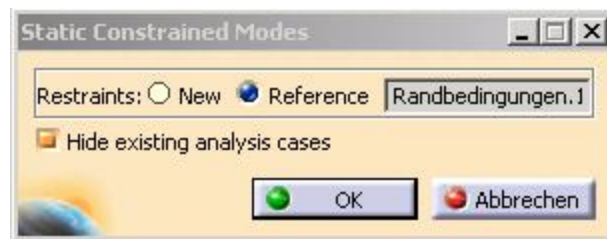
6.6.2 Durch die Statik erzwungene Frequenzen

Damit wird eine Modalanalyse unter Berücksichtigung der Randbedingungen zur Bauteillagerung durchgeführt.

6 Durchführung der Berechnungen

Aufgerufen wird auch dieser Prozess durch 'Einfügen' und 'Durch Statik erzwungene Modi'. Im darauf folgenden Eingabefenster können wiederum Referenzen von bereits vorhandenen Randbedingungen zugeordnet werden. Es ist aber auch eine Neudefinition der Randbedingungen zur Bauteillagerung möglich.

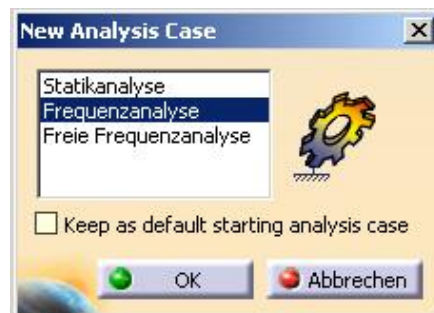
Auswahlfenster für die Randbedingungen der durch die Statik erzwungenen Modi



6.6.3 Frequenzprozess

Ziel des Frequenzprozesses ist die Berechnung der Eigenformen und Eigenfrequenzen eines Bauteils. Trifft eine Eigenfrequenz mit einer Anregungsfrequenz zusammen, führt dies zu Resonanz. Das wiederum bewirkt verstärkte Geräuschentwicklung sowie Vibrationen und kann im Extremfall sogar zur Zerstörung des Bauteils führen. Die Berechnung kann sowohl unter Berücksichtigung der Randbedingungen als auch als freie Frequenzanalyse ohne Randbedingungen erfolgen. Die Möglichkeit einer Frequenzanalyse bietet sich bereits beim Einstieg in die GPS-Arbeitsumgebung mit folgendem Fenster:

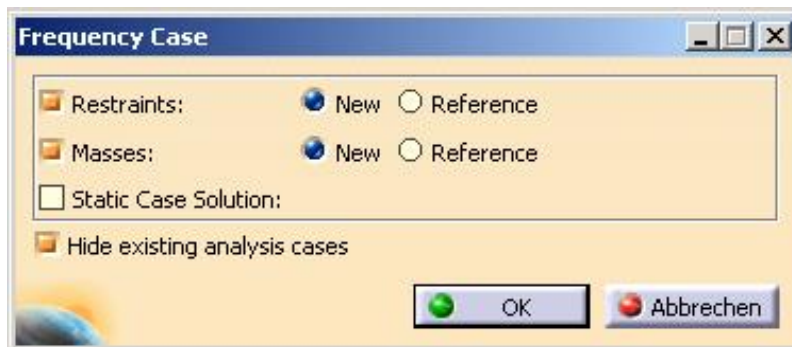
Auswahl des Analyseprozesses beim Einstieg in die GPS-Arbeitsumgebung



Hier kann sowohl eine Frequenzanalyse als auch eine freie Frequenzanalyse aufgerufen werden. Bei der freien Frequenzanalyse wird der Bauteil als frei im Raum, an einem unendlich dünnen Faden aufgehängt schwebend betrachtet.

6.6 Verfügbare FEM-Analysen

Es ist jedoch auch möglich, über 'Einfügen' und 'Frequenzprozess' im Anschluss an eine bereits durchgeführte Analyse einen Frequenzprozess einzufügen. Dabei erscheint wiederum folgendes Auswahlfenster:



Auswahlfenster für eingefügten Frequenzprozess

Es können die Randbedingungen als auch die Massenbelastung neu angesetzt, oder als Referenz zu bereits vorhandenen Definitionen bestimmt werden.

6.6.3.1 Übungsbeispiel Frequenzanalyse Zylindergehäuse

Im folgenden Übungsbeispiel soll die Durchführung von Frequenzprozessen erläutert werden. Es handelt sich beim untersuchten Bauteil um das Zylindergehäuse eines Kompressors, das sowohl unter Randbedingungen als auch frei einer Frequenzanalyse unterzogen wird. Ziel dieser Analyse ist es, die Eigenfrequenzen in Bereiche zu verschieben, die nicht mit der Anregungsfrequenz des Elektromotors, die im Bereich von 3000Hz liegt, zusammenfallen.

Öffnen Sie dazu die Datei *'Zyl_fem_fertig.CATPart'*. Da bereits das entsprechende Material zugeordnet ist, starten Sie die GPS-Arbeitsumgebung und wählen eine Frequenzanalyse.

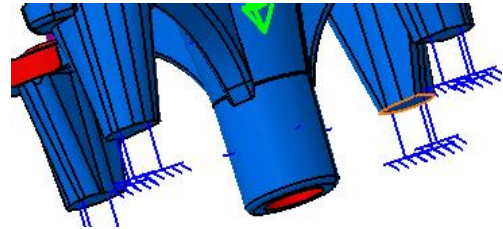
Im ersten Schritt soll eine Modalanalyse des Zylindergehäuses unter den Randbedingungen des Betriebszustands durchgeführt werden. Vergeben Sie dazu die Randbedingungen der Bauteillagerung wie folgt:

6 Durchführung der Berechnungen



Feste Einspannung

Definition der festen Einspannung am Elektromotor



Das Zylindergehäuse wird beim Montagevorgang fest mit dem Elektromotor verschraubt, wodurch die Auflageflächen der vier Füße als fest eingespannt definiert werden können.

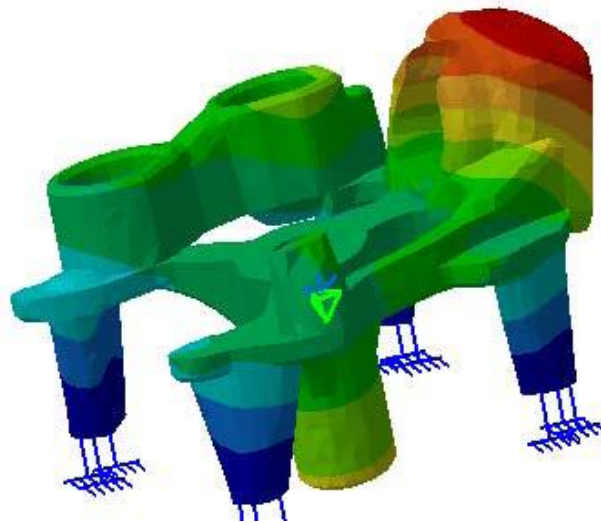
Daraufhin kann die Frequenzberechnung gestartet werden:



Berechnen

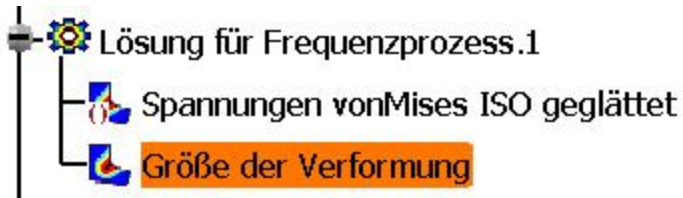
Zur Auswertung der Ergebnisse rufen Sie die Verformungen auf. Damit erhält man eine Darstellung der ersten Eigenform des Bauteils.

Visualisierung der ersten Eigenform



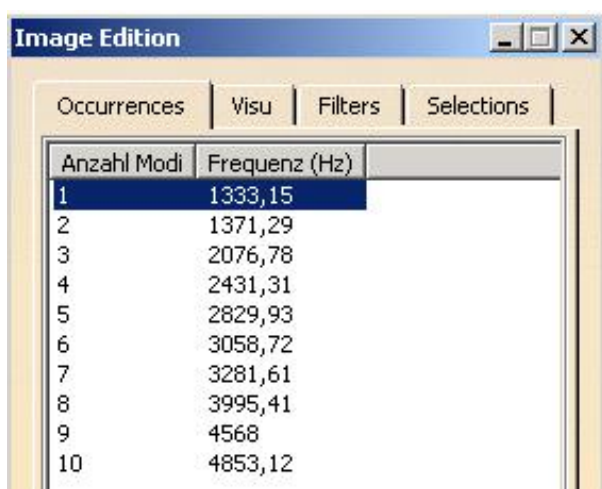
6.6 Verfügbare FEM-Analysen

Um auch die weiteren Eigenformen auswerten und visualisieren zu können, machen Sie einen Doppelklick auf den Eintrag 'Größe der Verformung' im Strukturbaum.



Aufruf des Selektionsfensters für die Verformungen

Damit erhält man eine Liste der ersten zehn Eigenformen und kann sich jede beliebige Eigenform anzeigen lassen.



Anzahl Modi	Frequenz (Hz)
1	1333,15
2	1371,29
3	2076,78
4	2431,31
5	2829,93
6	3058,72
7	3281,61
8	3995,41
9	4568
10	4853,12

Übersicht der errechneten Eigenformen mit der entsprechenden Frequenz

In diesem Fall ist ersichtlich, dass hier vor allem die 6.Eigenform mit einer Frequenz von 3059 Hertz sehr nahe an der Erregerfrequenz zu liegen kommt, was im Betrieb des Kompressors zu Problemen führen kann.

Sind auch die in einem höheren Frequenzbereich ermittelten Eigenformen von Interesse, kann die Anzahl der errechneten Modi erhöht werden. Dies geschieht mit einem Doppelklick auf den Eintrag 'Lösung für Frequenzprozess' im Strukturbaum:

6 Durchführung der Berechnungen

Aufruf weiterer Eingabeparameter für den Frequenzprozess



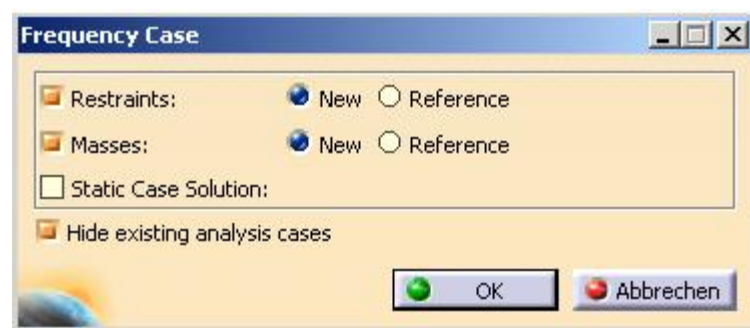
Damit erhält man ein weiteres Eingabefenster, in dem die Anzahl der Modi erhöht werden kann. Standardmäßig werden die ersten zehn Eigenformen ermittelt.

Eingabefenster zur Definition der zu errechnenden Eigenfrequenzen



In einem weiteren Berechnungsschritt soll nun eine Frequenzanalyse mit quasistatischer Lagerung durchgeführt werden. Gehen Sie dazu unter 'Einfügen' auf den Eintrag 'Frequenzprozess' und wählen Sie im darauf folgenden Fenster 'New':

Auswahl von 'New', um neue Randbedingungen zu vergeben



Daraufhin wird im Strukturbaum ein neuer Frequenzprozess eingefügt:

6.6 Verfügbare FEM-Analysen



Neuer Frequenzprozess wird im Strukturbaum eingefügt

Sie können auch hier Randbedingungen und Massen definieren.

In unserem Berechnungsbeispiel definieren Sie das Zylindergehäuse jetzt als quasistatisch gelagert:

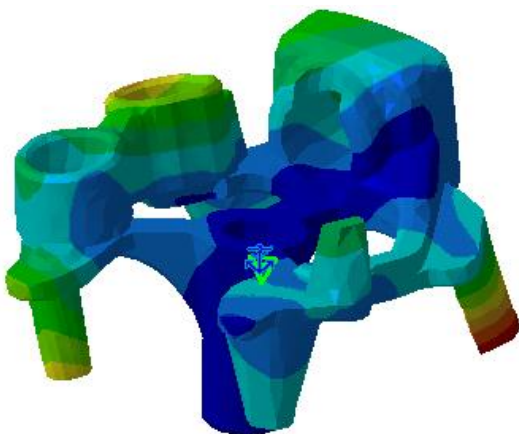


Isostatische Randbedingung



Definition einer quasistatischen Lagerung

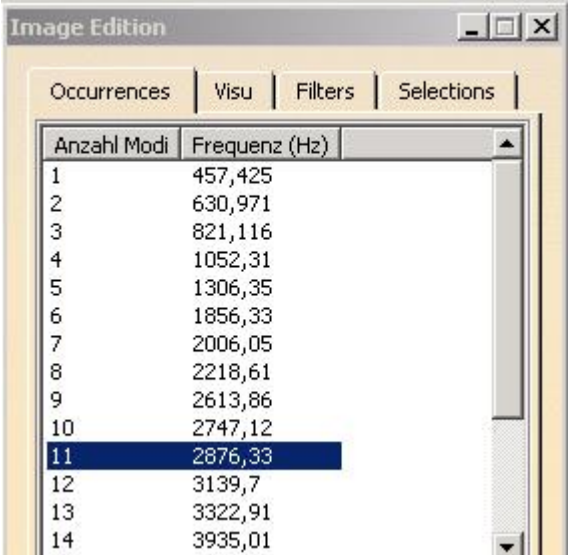
Damit können Sie erneut die Berechnung starten. Die Auswertung der Eigenformen (hier wurde die Anzahl der Modi auf 20 erhöht, um auch die Frequenzen im Bereich von 300Hz zu erhalten) führt zu folgendem Ergebnis:



Kritische Eigenform im Bereich von 2876Hz

6 Durchführung der Berechnungen

Berechnung von
zwanzig Eigenformen



Anzahl Modi	Frequenz (Hz)
1	457,425
2	630,971
3	821,116
4	1052,31
5	1306,35
6	1856,33
7	2006,05
8	2218,61
9	2613,86
10	2747,12
11	2876,33
12	3139,7
13	3322,91
14	3935,01

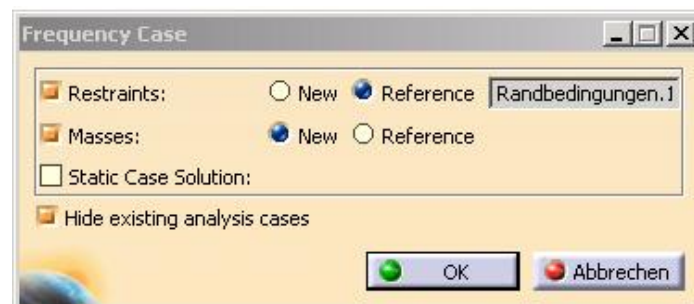
Die in Frequenzberechnungen ausgewiesenen Werte für Spannungen sowie Verformungen sind als rein qualitativ zu betrachten und geben damit nur eine Tendenz wieder, haben aber keine Entsprechung in der Realität.

Die oben angeführten Schritte zur Ausführung des Übungsbeispiels erhalten Sie auch mit der Datei *'Frequenzprozesse_zyl.CATAnalysis'*.

In einem dritten Rechenschritt wird das Zylindergehäuse zusätzlich mit einer Masse belastet. Dies dient zur Simulation des Elektromotors.

Fügen Sie auf dem schon bekannten Weg einen neuerlichen Frequenzprozess ein und selektieren Sie die Randbedingungen aus der ersten Berechnung (fixe Einspannung der Füße) als Referenz:

Auswahl einer vorhandenen Referenz



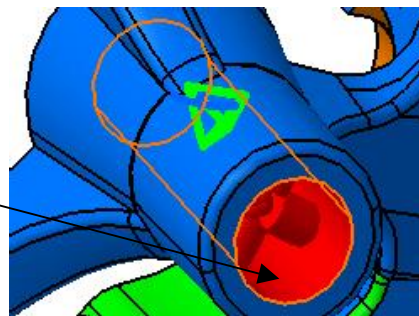
6.6 Verfügbare FEM-Analysen

Diese Randbedingungen werden somit in den neu definierten Frequenzprozess übernommen. Nun wird der Flansch des Zylindergehäuses mit der Masse des Rotors, der auf der Kurbelwelle aufgedrückt ist, zusätzlich belastet. Wählen Sie dazu das Icon 'Verteilte Last' in der Symbolleiste 'Massen':



Verteilte Masse

Damit erhalten Sie ein weiteres Eingabefenster:



Definition einer zusätzlichen Massenbelastung

Selektieren Sie als Stützfläche die Mantelfläche der Bohrung, in der Kurbelwelle sowie Rotor gelagert sind. Die Masse geben Sie mit 1,2kg ein.

Eine danach durchgeführte Berechnung ergibt folgende Eigenformen:

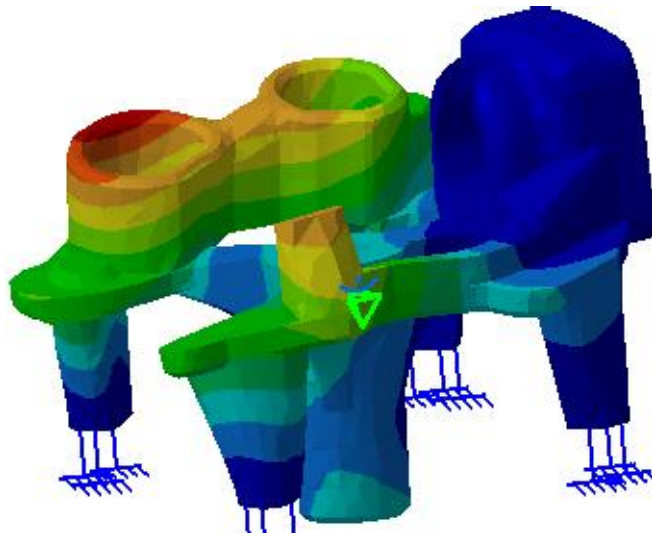
Anzahl Modi	Frequenz (Hz)
1	730,74
2	797,733
3	1066,34
4	1679,83
5	1733,53
6	2348,25
7	2429,54
8	3277,08
9	3721,98
10	3885,28

Berechnete Eigenformen bei zusätzlicher Massenbelastung durch den Rotor

6 Durchführung der Berechnungen

Die kritische Eigenform im Bereich von 3000Hz verhält sich hier folgendermaßen:

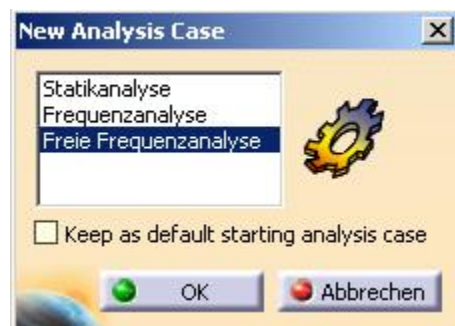
Analyse der kritischen
Eigenform



6.6.3.2 Freie Frequenzanalyse Zylindergehäuse

Abschließend wird für das vorliegende Zylindergehäuse eine freie Frequenzberechnung durchgeführt. Dazu starten Sie wiederum mit der Datei '*Zyl_fem_fertig.CATPart*'. Rufen Sie als Nächstes die GPS-Arbeitsumgebung auf, und wählen Sie nun die Freie Frequenzanalyse:

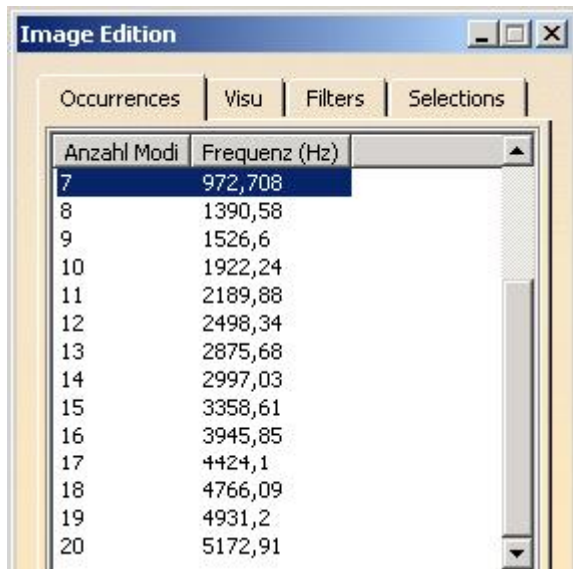
Auswahl der Freien
Frequenzanalyse



Nach dieser Selektion ist für die Freie Frequenzanalyse bereits die Berechnung durchführbar. Es empfiehlt sich in diesem Fall, auf zwanzig zu berechnende Modi umzustellen, da die ersten errechneten Eigenformen im Bereich von 0 Hz liegen und

6.6 Verfügbare FEM-Analysen

in der Realität nicht auftreten. Eine Übersicht der errechneten Eigenfrequenzen ergibt folgende Tabelle:



The screenshot shows a software window titled 'Image Edition' with a menu bar containing 'Occurrences', 'Visu', 'Filters', and 'Selections'. Below the menu is a table with two columns: 'Anzahl Modi' (Number of Modes) and 'Frequenz (Hz)' (Frequency in Hz). The table lists 20 modes, with the 7th mode highlighted in blue.

Anzahl Modi	Frequenz (Hz)
7	972,708
8	1390,58
9	1526,6
10	1922,24
11	2189,88
12	2498,34
13	2875,68
14	2997,03
15	3358,61
16	3945,85
17	4424,1
18	4766,09
19	4931,2
20	5172,91

Eigenformen bei der
Freien Frequenzanalyse

Dabei ergibt sich wiederum eine kritische Eigenform bei ungefähr 3000Hz mit folgendem Erscheinungsbild:



Kritische Eigenform bei
2997Hz

6 Durchführung der Berechnungen

Die Ergebnisse dieser Berechnung erhalten Sie auch über die Datei *'Freie_frequenzanalyse.CATAnalysis'*.

6.6.3.3 Symbolleiste Masse

Mit dieser Symbolleiste kann eine Belastung des Bauteils mit zusätzlichen Massenkraften definiert werden. Dies kann vor allem bei Frequenzanalysen notwendig sein. Folgende Icons stehen zur Verfügung:

Icons der Symbolleiste 'Masse'



Verteilte Last (Verteilte Masse)



Streckenlast (Linienmasse)



Flächenlast (Flächenmasse)

Mit der verteilten Last (besser: verteilte Masse) wird auf ein Stützelement eine Massenbelastung aufgebracht. Folgende Stützelemente kommen in Frage:

Mechanical Feature	Geometrical Feature					Analysis Feature	Mesh Part
	Point or Vertex	Curve or Edge	Surface or Face	Body (Solid or Surface)	Groups		
						 virtual part	

Die Standardeinheit für die verteilte Masse ist Kilogramm (kg). Die konzentriert aufgebrachte Masse wird automatisch in eine äquivalente zusammengefasste Masse, die über das gesamte Stützelement verteilt wird, umgewandelt.

Mit der Streckenlast (besser: auf eine Strecke verteilte Masse) wird analog dazu eine Massenbelastung für Kanten oder Kurven definiert. Die Standardeinheit ist in diesem Fall Kilogramm pro Meter (kg_m).

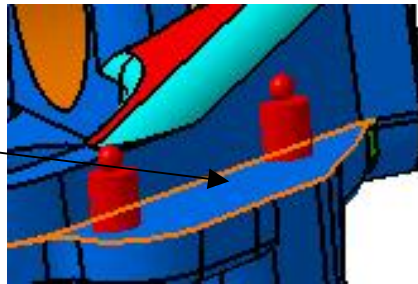
6.6 Verfügbare FEM-Analysen

Schlussendlich kann mit der Flächenlast (besser: auf eine Fläche verteilte Masse) eine Massenbelastung für eine selektierte Fläche definiert werden. Die Standardeinheit ist hier Kilogramm pro Quadratmeter (kg_m^2).

Die Vorgangsweise bei der Definition von Massenbelastungen ist in allen drei Fällen gleich. Nach dem Aufruf des entsprechenden Icons erscheint ein weiteres Eingabefenster zur Selektion des Stützelements und zur Angabe der Masse.



Auf Fläche verteilte Masse



Definition einer Massenbelastung bei der Frequenzanalyse

Nach erfolgreicher Definition wird die Masse symbolisch durch ein Gewicht auf dem gewählten Stützelement angedeutet.

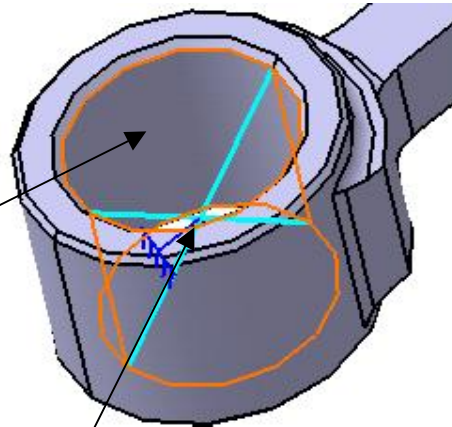
6.6.4 Beulprozess

Ziel dieses Prozesses ist die Knickberechnung von Bauteilen. Es kann bei diesem Prozess nur auf einen bereits vorhandenen statischen Prozess aufgesetzt werden. Der Prozess wird wiederum aufgerufen durch 'Einfügen' und 'Beulprozess'.

Im angeführten Übungsbeispiel soll eine Knickberechnung für ein Pleuel durchgeführt werden. Öffnen Sie dazu die Datei '*Pleuel1.CATPart*'. Daraufhin starten Sie die Arbeitsumgebung GPS und führen als Erstes eine statische FEM-Analyse durch. Der erste Schritt ist die Definition der Randbedingungen zur Bauteillagerung. Das Pleuel ist im Kurbelzapfen gleitgelagert, was durch ein starres virtuelles Element im großen Pleuelauge, welches fix eingespannt ist, abgebildet wird.

6 Durchführung der Berechnungen

Definition eines
starren virtuellen Teils
zur Simulation des
Kurbelzapfens

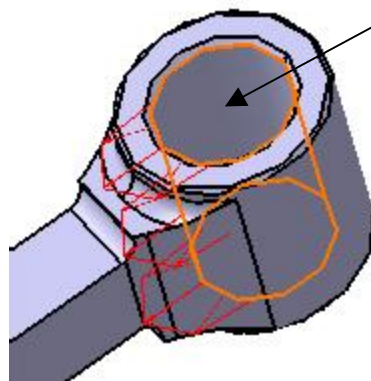


Definition der festen
Einspannung für das
virtuelle Teil



Als Nächstes ist die Lagerlast für das kleine Pleuelauge zu definieren. Im kritischen Fall kann diese verteilte Lagerlast einen Wert von 1600N erreichen.

Definition der Lager-
last für das kleine
Pleuelauge



6.6 Verfügbare FEM-Analysen

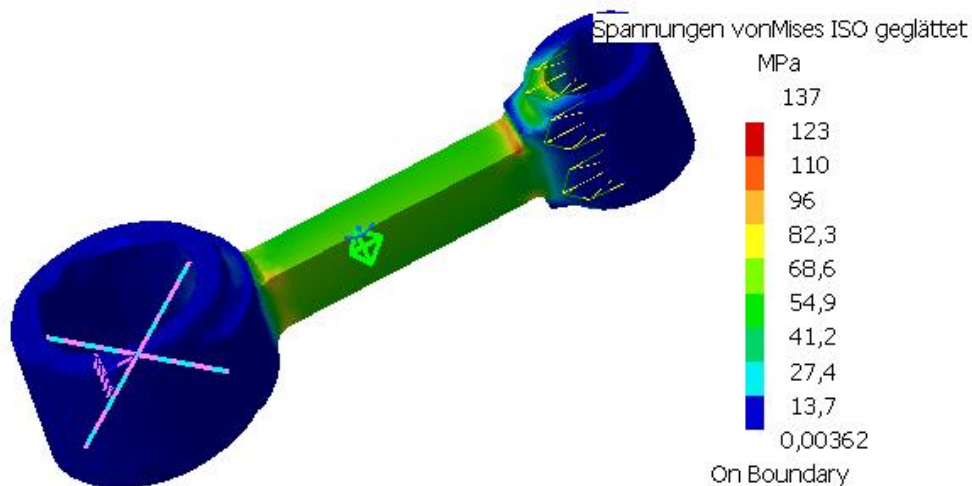
Die Stützfläche ist die Mantelfläche des kleinen Pleuelauges. Wählen Sie das globale Koordinatensystem und geben Sie die Kraft von 1600N in X-Richtung ein. Die Lagerlast wirkt radial unter einem Winkel von 90° und ist sinusförmig verteilt.

Führen Sie eine statische Analyse mit parabolischen Tetraeder-Elementen folgender Spezifikation durch:



Verwendete parabolische Elemente

Das Ergebnis der statischen Analyse stellt sich folgendermaßen dar:



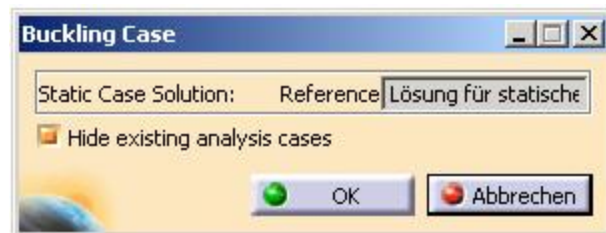
Analyse des Spannungsverlaufs

6 Durchführung der Berechnungen

Die maximalen Spannungen liegen jeweils im Übergang vom Pleuelschaft zu den beiden Augen und betragen ungefähr 130N/mm^2 .

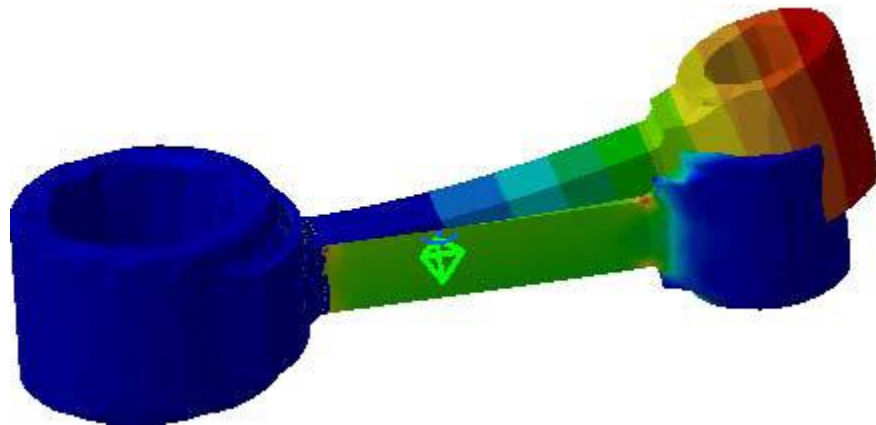
Im nächsten Schritt soll das Pleuel auf Knickung berechnet werden. Dabei sollen die möglichen Knickfälle dargestellt werden. Fügen Sie, wie zuvor beschrieben, einen Beulprozess ein. Im Eingabefenster selektieren Sie die Lösung des soeben durchgeführten statischen Prozesses durch Auswahl im Strukturbaum als Referenz.

Selektion der Referenz
für den Beulprozess

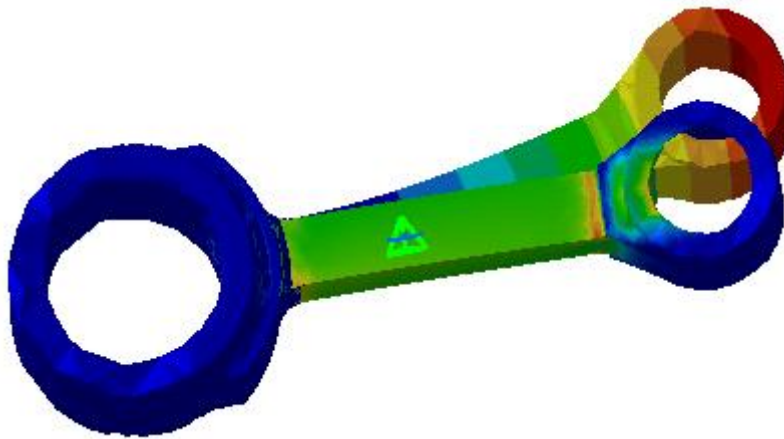


Somit können Sie die Berechnung des Beulprozesses starten. Verwenden Sie für den Beulprozess dasselbe vorhin erzeugte Netz. Die Analyse der Berechnungsergebnisse zeigt folgende kritische Knickfälle:

Erster kritischer
Knickfall



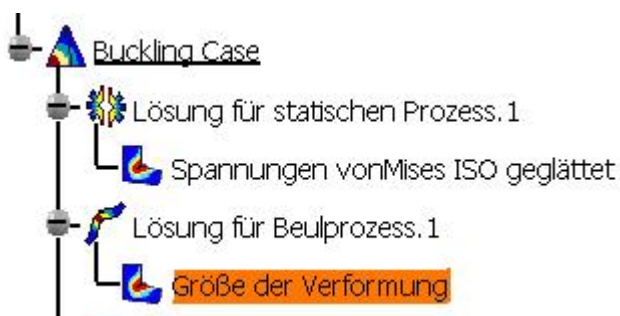
6.6 Verfügbare FEM-Analysen



Zweiter kritischer
Knickfall

Die angeführten Bilder zeigen die zwei kritischen Knickfälle, wobei jeweils der jeweilige Knickfall (Verformungen) und die im ersten Schritt errechnete Spannungsverteilung übereinander eingeblendet wurden. Im ersten Fall knickt das Pleuel nach oben bzw. nach unten aus und im zweiten Fall nach links bzw. rechts.

Die Beulfaktoren geben die Wahrscheinlichkeit (Sicherheit) des Auftretens des jeweiligen Knickfalls an. Je geringer der Beulfaktor, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Bauteil ausknickt. Sie erhalten die Beulfaktoren durch einen Doppelklick im Strukturbaum auf 'Größe der Verformung':

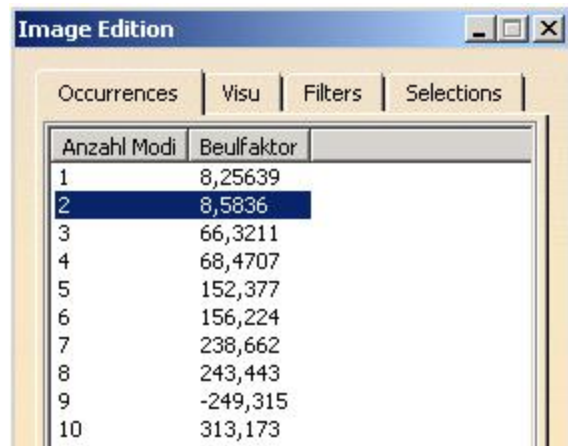


Aufrufen der
Beulfaktoren

Damit ergibt sich folgendes Übersichtsbild:

6 Durchführung der Berechnungen

Übersicht der Knickfälle und der dazugehörigen Beulfaktoren



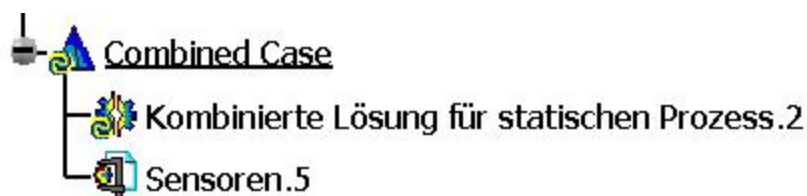
Anzahl Modi	Beulfaktor
1	8,25639
2	8,5836
3	66,3211
4	68,4707
5	152,377
6	156,224
7	238,662
8	243,443
9	-249,315
10	313,173

Man kann der obigen Tabelle entnehmen, dass nur die beiden ersten Knickfälle kritisch sind und die anderen in der Realität nicht auftreten. Sie erhalten die Ergebnisse dieses Beulprozesses auch nach Berechnung über die Datei *'Pleuel_beulprozess.CATAnalysis'*.

6.6.5 Kombierter Prozess

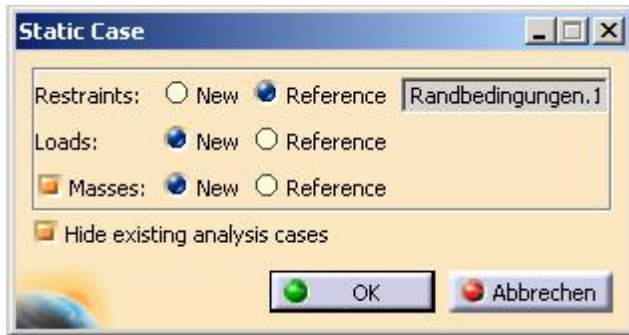
Ein kombinierter Prozess stellt eine Verknüpfung mehrerer statischer Prozesse dar. Voraussetzung für die Kombinierbarkeit mehrerer statischer Prozesse ist jedoch, dass die Randbedingungen der Bauteillagerung identisch sind. Um einen kombinierten Prozess aufzurufen, selektiert man 'Einfügen' und dann 'Kombinierter Prozess'. Im Strukturbaum erscheint daraufhin der entsprechende Eintrag:

Kombinierter Prozess im Strukturbaum eingefügt



Als Übungsbeispiel für den kombinierten Prozess, setzen wir die vorhin durchgeführte FEM-Analyse des Pleuels fort. Verwenden Sie dazu wieder die Berechnungsdatei *'Pleuel_beulprozess.CATAnalysis'*. Zuerst wird eine zweite statische Berechnung eingefügt. Dazu verwenden Sie die Randbedingungen zur Bauteillagerung aus dem ersten statischen Prozess als Referenz:

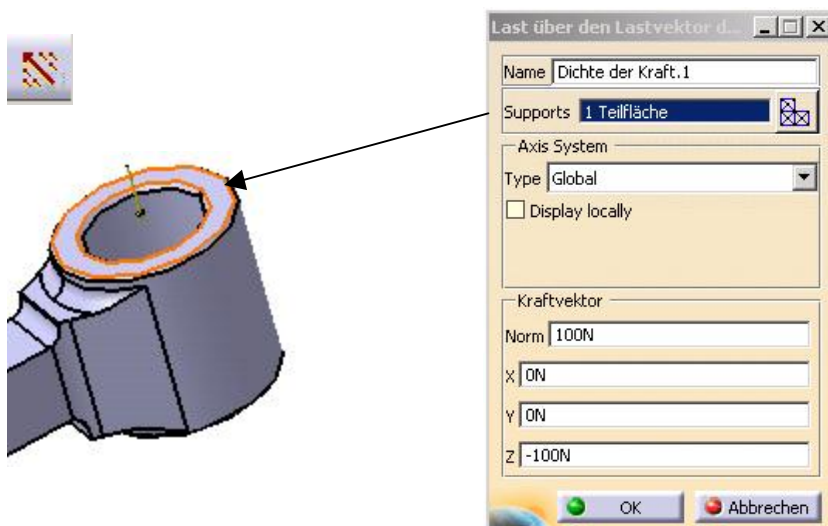
6.6 Verfügbare FEM-Analysen



Selektion der Randbedingungen des bereits vorhandenen statischen Prozesses als Referenz



Nun müssen Sie die Belastung für den zweiten statischen Prozess definieren. Wählen Sie eine Kraftdichte von 100N für die obere Fläche des kleinen Pleuelauges:



Definition der Belastung für den zweiten statischen Prozess

6 Durchführung der Berechnungen

Als Nächstes führen Sie die Berechnung für den zweiten statischen Prozess auf die übliche Weise durch.

Nun kann auf dem oben beschriebenen Weg ein kombinierter Prozess eingefügt werden.

Danach rufen Sie durch einen Doppelklick auf 'Kombinierte Lösung für statischen Prozess' das nächste Eingabefenster auf:

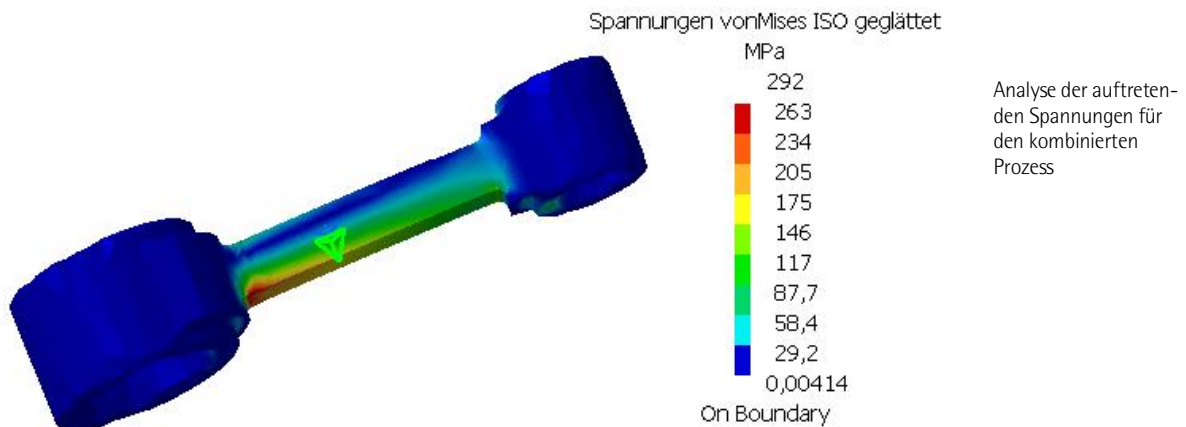
Auswahl der Lösungen
für den kombinierten
Prozess

Index	Selected Solution	Coefficient
1	Lösung für statischen Prozess.1	1
2	Lösung für statischen Prozess.2	1

Im Feld 'Selected Solution' wählen Sie im Strukturbaum die Lösung für den statischen Prozess.1. Mit dem Feld 'Coefficient' kann zusätzlich eine Gewichtung der kombinierten statischen Prozesse vorgenommen werden. Hier gewichten Sie beide Prozesse gleich, womit der Faktor auf 1 belassen wird. Dann selektieren Sie in der Liste der ausgewählten Lösungen den ersten statischen Prozess und rufen mit einem Klick der rechten Maustaste das Kontextmenü auf. Hier wählen Sie 'Add' und selektieren anschließend im Strukturbaum die Lösung für den statischen Prozess.2.

Damit steht einer Berechnung des kombinierten Prozesses nichts mehr im Wege. Die Analyse der erhaltenen Ergebnisse zeigt eine Überlagerung der beiden Belastungen des Pleuels. Dies ist am besten durch eine Darstellung der VonMises-Vergleichsspannungen ersichtlich:

6.6 Verfügbare FEM-Analysen

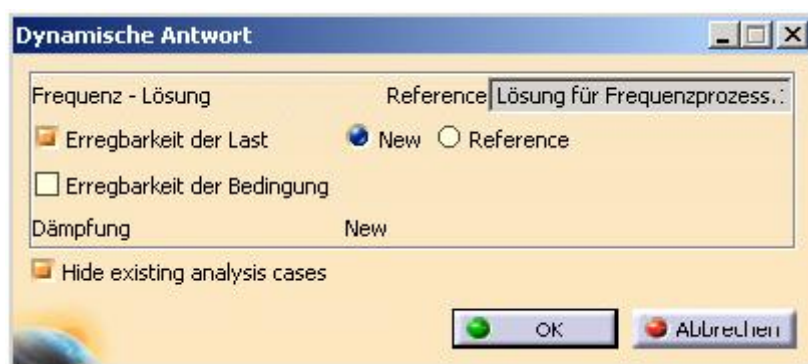


Diese Ergebnisse erhalten Sie auch mit der Datei *'Pleuel_kombinierter_Prozess.CATAnalysis'*.

Mit dem kombinierten Prozess können auch mehr als zwei statische Prozesse kombiniert und entsprechend gewichtet werden.

6.6.6 Dynamische Antwort

Ein dynamischer Prozess berücksichtigt eine veränderliche Last sowie eine Dämpfung. Zum Einfügen einer dynamischen Antwort, müssen ein statischer Prozess und ein Frequenzprozess bereits berechnet worden sein. Nach dem Aufruf zum Einfügen eines dynamischen Prozesses (dynamische Antwort) erhält man ein weiteres Auswahlfenster:

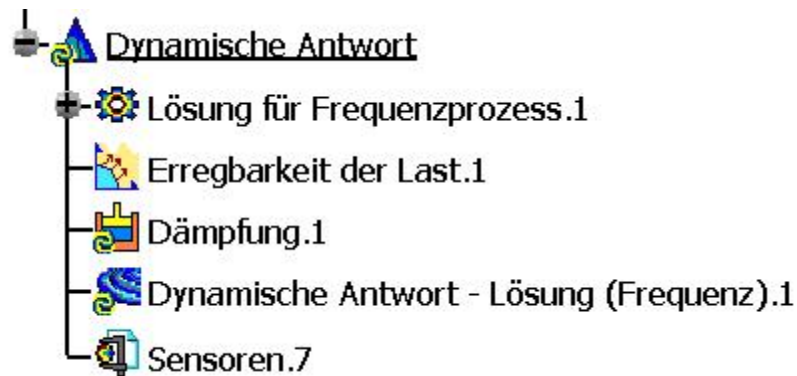


Auswahlfenster beim Einfügen eines dynamischen Antwortprozesses

6 Durchführung der Berechnungen

Es ist notwendig, die Lösung für einen bereits durchgerechneten Frequenzprozess als Referenz zu selektieren. Daraufhin erhält man im Strukturbaum einen dynamischen Antwortprozess eingefügt:

Strukturbaum mit eingefügtem dynamischen Antwortprozess



Hier ist es weiters noch möglich, eine Erregungsfunktion für die Last sowie eine Dämpfungsfunktion zu definieren. In jedem Fall müssen jedoch durch einen Doppelklick auf den Eintrag 'Dynamische Antwort - Lösung' weitere Parameter für die Berechnung definiert werden:

Weitere Eingabeparameter für die dynamische Antwort

Ein Dialogfeld mit dem Titel 'Dynamisches Antwort-Set'. Es enthält vier Eingabefelder: 'Name' mit dem Wert 'Dynamische Antwort - Lösung (Frequenz).1', 'Minimale Abtastrate' mit dem Wert '0Hz', 'Maximale Abtastrate' mit dem Wert '1000Hz' und 'Anzahl Schritte' mit dem Wert '20'. Am unteren Rand befinden sich zwei Buttons: 'OK' und 'Abbrechen'.

Nach der Definition der Abtastrate und der Dämpfung kann der Prozess berechnet werden.

7 Auswertung der Ergebnisse

Zur Auswertung und Darstellung der Berechnungsergebnisse stehen in der GPS-Arbeitsumgebung eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung:



Darstellung des Netzes



Darstellung der VonMises-Vergleichsspannungen



Darstellung der Verformungen



Darstellung der Hauptspannungen



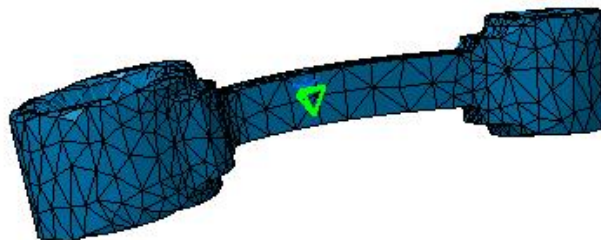
Darstellung der Genauigkeit (Darstellung des Fehlers)

7.1 Darstellung des Netzes

Mit diesem Befehl wird das generierte Netz angezeigt. Nach einer bereits erfolgten Berechnung wird zusätzlich die auftretende Verformung des Bauteils dargestellt.



Verformung



Darstellung des
verformten Netzes

7 Auswertung der Ergebnisse

Im Weiteren kann mit Hilfe dieses Icons bei Vorhandensein einer Singularität der noch mögliche Freiheitsgrad der Bewegung animiert werden. Dazu sind folgende Icons zu selektieren:



'Netzdarstellung' und



'Animieren'

Es ist damit in einfacher Form möglich, die vorhandene Singularität zu erkennen und zu beseitigen.

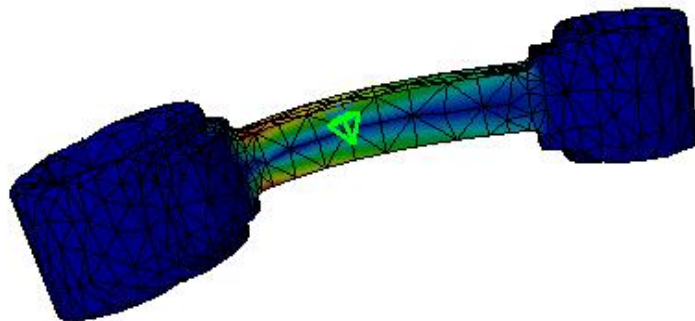
7.2 VonMises-Vergleichsspannungen

Damit lassen sich nach erfolgreicher Berechnung die auftretenden Spannungen anzeigen. Es handelt sich dabei um Vergleichsspannungen, die nach der Gestaltänderungsenergiehypothese ermittelt werden. Diese Hypothese gilt für duktile (zähe) Werkstoffe, wobei hier die bei der Verformung eines elastischen Körperelements gespeicherte Energie das Kriterium darstellt. Überschreitet diese den werkstoffabhängigen Grenzwert, versagt der Bauteil infolge der plastischen Formänderung. Es empfiehlt sich damit ein Vergleich mit der jeweiligen Streckgrenze des Werkstoffes. Die Gestaltänderungsenergiehypothese zeigt sehr gute Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen. Die VonMises-Vergleichsspannung errechnet sich nach folgender Formel:

$$\sigma_v = 1/\sqrt{2} * (\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2})$$

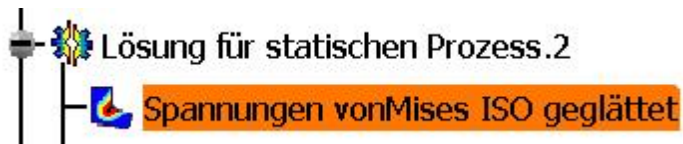
Die Darstellung der Spannungen erfolgt nach dem Aufruf des Icons 'VonMises-Belastung':

Darstellung der
VonMises-
Vergleichsspannungen

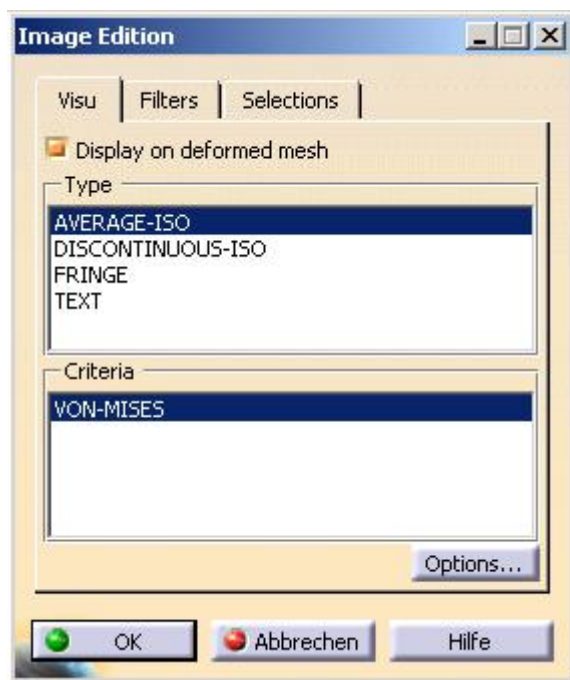


7.2 VonMises-Vergleichsspannungen

Durch einen Doppelklick im Strukturbaum auf die VonMises-Vergleichsspannungen ergibt sich eine Reihe weiterer Einstellmöglichkeiten:



Man erhält folgendes Auswahlfenster:

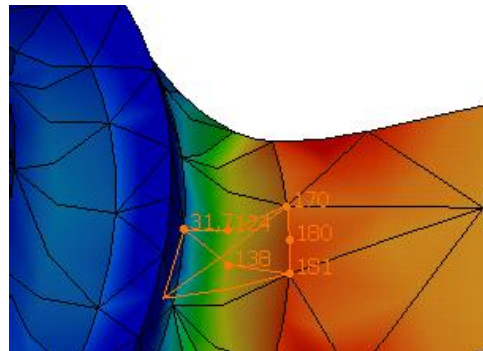


Darstellungsmöglichkeiten
der Spannungen

In der Kartei 'Visu' kann die gewünschte Darstellung verändert werden. Standardmäßig werden die Spannungen mit 'Average-ISO', nämlich den farbschattierten, geglätteten Durchschnittswerten der einzelnen Elementknoten dargestellt:

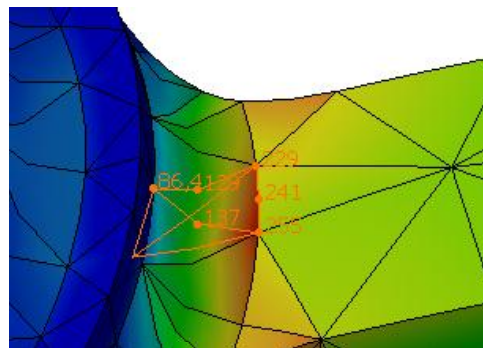
7 Auswertung der Ergebnisse

Farbschattierte Darstellung der Spannungen in den einzelnen Knoten (geglättet)



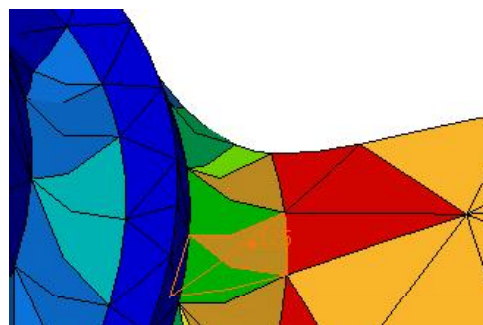
Die Einstellung 'Discontinuous-ISO' liefert die nicht geglätteten (unstetigen) Werte für die FEM-Elemente (Knoten) und weist somit höhere Werte aus:

Diskontinuierliche farbschattierte Spannungswerte in den einzelnen Knoten



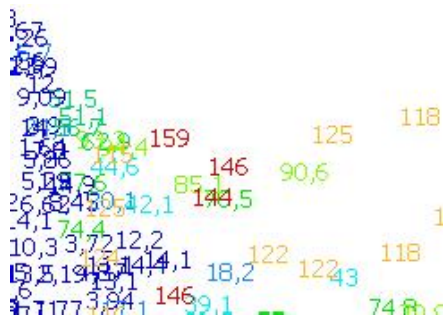
Mit der Einstellung 'Fringe' erhält man die Mittelwerte der Spannungen aller Knoten eines Elements im Mittelpunkt angezeigt:

Spannungswerte im Elementmittelpunkt farbschattiert angezeigt



7.2 VonMises-Vergleichsspannungen

Schlussendlich liefert die Einstellung 'Text' die im Mittelpunkt des jeweiligen Elements konzentrierten Spannungen als numerisch angezeigten Wert:



Spannungen im
Elementmittelpunkt
als Text ausgewiesen

Die Kartei 'Filter' ist in diesem Fall nicht relevant. Die Kartei 'Selections' liefert folgendes Auswahlbild:



Selektion der Darstel-
lung einzelner Netze

Diese Auswahlmöglichkeit ist vor allem bei der Analyse von Baugruppen von entscheidender Bedeutung, da damit die Spannungen einzelner Bauteile selektiert und dargestellt werden können (siehe Übungsbeispiele zur Baugruppenanalyse).

Durch einen Doppelklick auf die Darstellungsskala der VonMises-Vergleichsspannungen lassen sich weitere Einstellungen bezüglich der Farbzunordnung treffen:

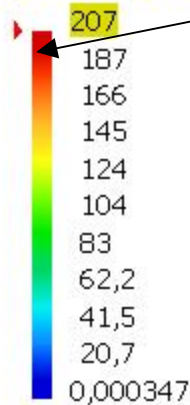
7 Auswertung der Ergebnisse

Skala der Vergleichs-
spannungen

Spannungen von Mises ISO geglättet

Max : 207,463 MPa

Min : 0,00034731 MPa



On Boundary

Doppelklick auf die Farbskala

Klick auf den Button 'Mehr',
um den rechten Teil des Fens-
ters zu erhalten

Parameter für die Farb-
zuordnung

Bearbeitung der Farbenzuordnungstabelle

☒ Auf Begrenzung

Anzahl Farben: 10

☒ Glättung ☐ Umkehren

☒ Vorgegebener Maximalwert: 207,463

☐ Vorgegebener Mindestwert: 0,00034731

Verteilungsmodus: Linear

Index	Wert	Vorgeg...
9	186,717	No
8	165,97	No
7	145,224	No
6	124,478	No
5	103,732	No
4	82,9854	No
3	62,2391	No

<< Weniger

Format anzeigen

Darstellung: Automatisch

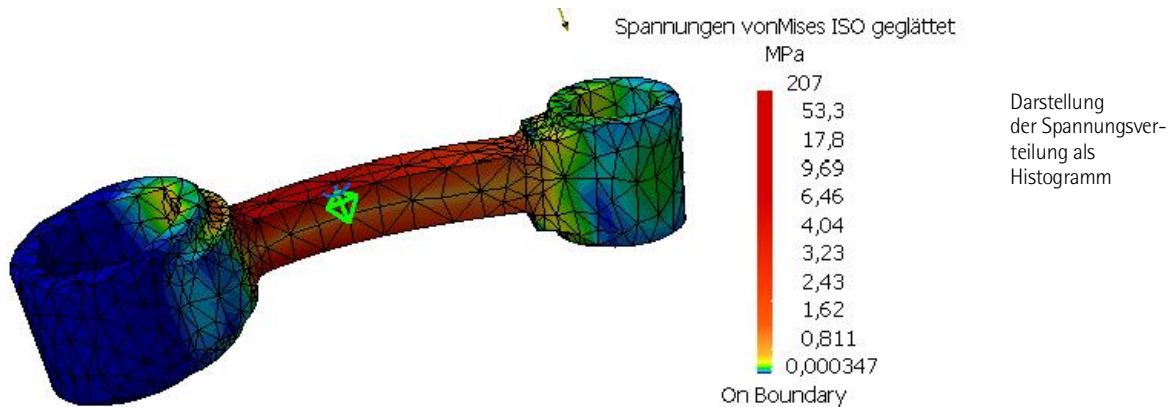
Anzahl bedeutender Stellen: 3

OK Anwenden Abbrechen

In dem dargestellten Eingabefenster kann im Feld 'Anzahl Farben' definiert werden, wie viele Farben zur Wiedergabe der Spannungen verwendet werden. Die Eingabe eines vorgegebenen Maximalwertes oder Minimalwertes lässt sich auch durch das Visualisierungsbild verändern. Dies kann bei Bauteilen mit sehr hohen lokalen Spannungen sinnvoll sein, um diese herauszufiltern und den Spannungsverlauf in den übrigen Bereichen besser darzustellen.

7.3 Darstellung der Verformungen

Der Verteilungsmodus wird standardmäßig als linear gewählt, kann aber auch logarithmisch oder als Histogramm dargestellt werden:



In der darunter liegenden Tabelle ist es möglich, die Verteilung der Farben selbst zu editieren und somit die gewünschten Bereiche für jede Farbe anzugeben. Es kann zum Beispiel die Streckgrenze als kritischer Wert für die Farbe Rot angegeben werden. Somit sind alle Spannungen, die diesen Wert überschreiten, sofort ersichtlich. Diese Einstellung ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die ausgewiesenen Vergleichsspannungen im Bereich der Streckgrenze liegen.

7.3 Darstellung der Verformungen

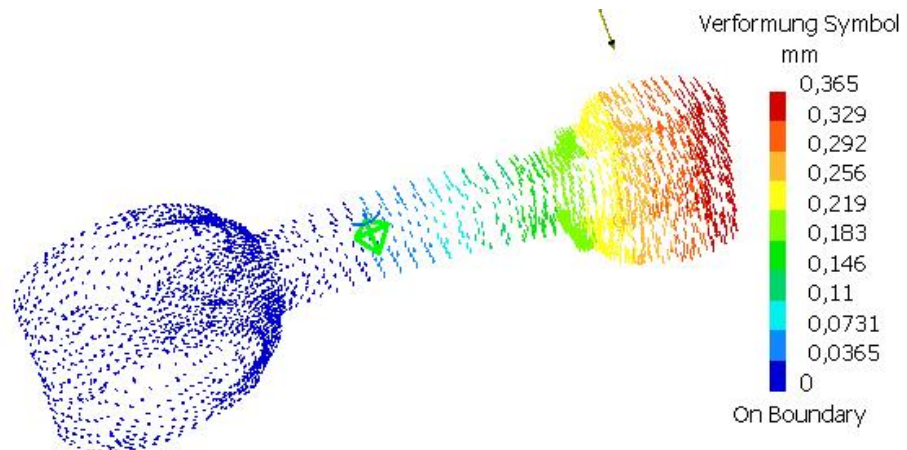
Damit lassen sich die auftretenden Verformungen eines berechneten Bauteils darstellen. Nach dem Aufruf des Icons 'Abweichung' erhält man beispielhaft folgende Darstellung:



Abweichung

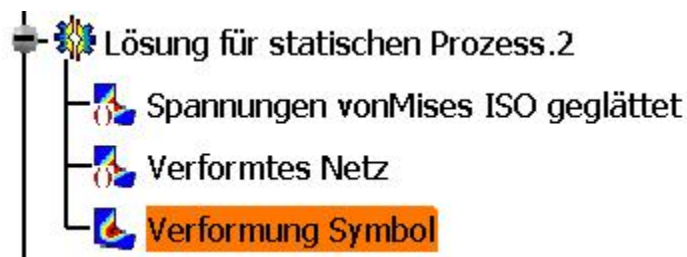
7 Auswertung der Ergebnisse

Darstellung der Verformungen auf vektorielle Weise

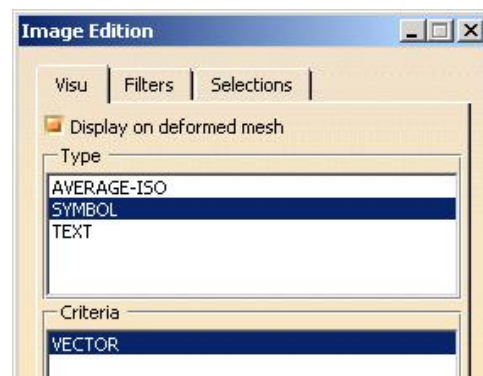


Die am FEM-Element dargestellten Verformungen werden standardmäßig durch einen Vektor, der in die entsprechende Richtung zeigt, visualisiert.

Durch einen Doppelklick auf den entsprechenden Eintrag im Strukturbaum können wiederum die Darstellungsparameter geändert werden:

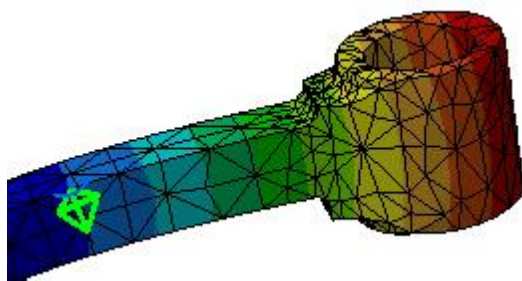


Parameter zur Darstellung der Verformungen



7.4 Darstellung der Hauptspannungen

Die Einstellung 'Average-ISO' ergibt eine farbschattierte geglättete Darstellung:



Darstellung der Verschiebungen in einer farbschattierten geglätteten Weise

Dabei ergibt die Auswahl von 'Normalize' eine Vektoraddition der Einzelkomponenten. Die Wahl von 'Vector_Component' ergibt eine Darstellung in den Einzelrichtungen V1, V2 oder V3, je nachdem, welcher Vektor in der Kartei 'Filters' selektiert wurde.

Die Auswahl 'Text' ermöglicht die Angabe des numerischen Wertes für jedes Element, ist jedoch sehr unübersichtlich.

Die Einstellungen für die Farbzuzuordnung entsprechen den bei den Spannungen beschriebenen Möglichkeiten.

7.4 Darstellung der Hauptspannungen

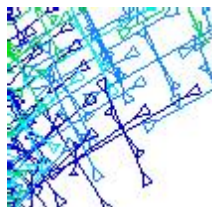
Mit dieser Darstellung werden die Hauptspannungen mit Richtung und Betrag in jedem Knoten angezeigt. Durch die Pfeilrichtung kann in Zug- und Druckspannungen unterschieden werden:



Hauptspannung



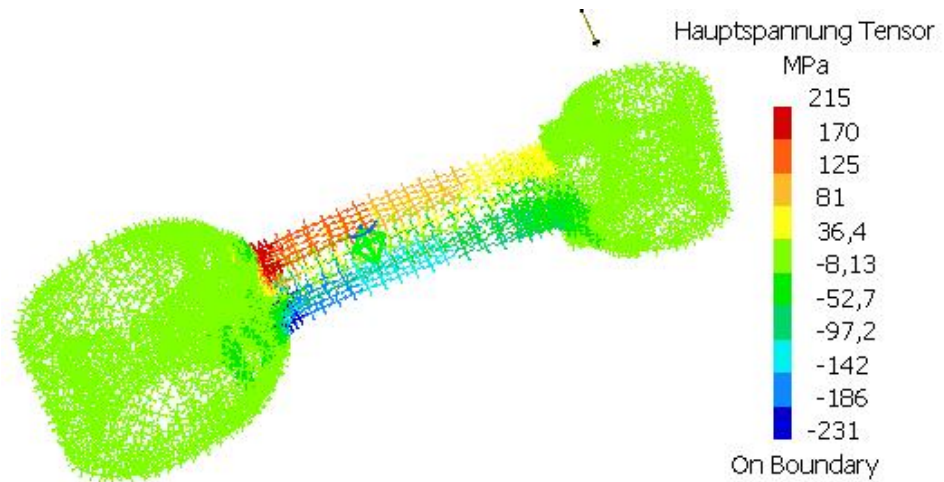
Zugbereich



Druckbereich

7 Auswertung der Ergebnisse

Standardmäßige
Darstellung der
Hauptspannungen

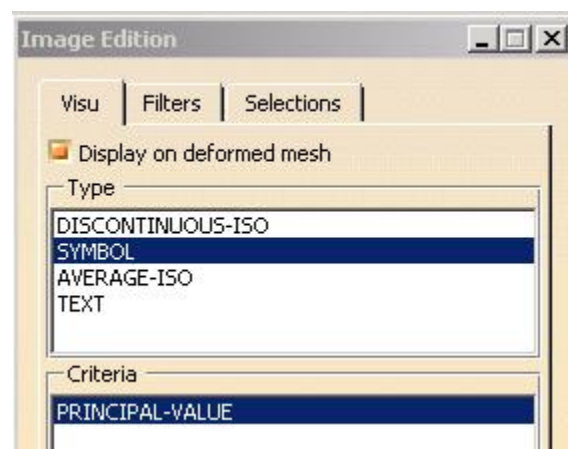


Auch in der angeführten Skala sind Zug- und Druckbereich zu erkennen (Druckspannungen haben negative Vorzeichen).

Durch einen Doppelklick im Strukturbaum können auch hier die Parameter verändert werden:



Damit erhält man folgendes Auswahlfenster:



Darstellungsvarianten
der Hauptspannungen

7.4 Darstellung der Hauptspannungen

Standardmäßig werden die Hauptspannungen in der symbolischen Form angezeigt. Es gibt jedoch auch die Darstellungsvarianten Average-Iso, Discontinuous-ISO und Text. Eine Beschreibung dieser Varianten findet sich im Kapitel über die VonMises-Vergleichsspannungen. Hier werden nun noch die bei den Hauptspannungen zusätzlichen Auswahlkriterien bezüglich der Versagenshypothese beschrieben.

7.4.1 Die Normalspannungshypothese

Die Normalspannungshypothese (NH) gilt für spröde Werkstoffe und setzt voraus, dass der Bruch senkrecht zur Richtung der größten Normalspannung erfolgt. Überschreitet diese den Festigkeitskennwert des Werkstoffes (Zugfestigkeit R_m), tritt der Bruch ein. Folgender Zusammenhang gilt:

$$\sigma_1 = (\sigma_x + \sigma_y)/2 * (\sqrt{((\sigma_x - \sigma_y)/2)^2 + \tau_{xy}^2})$$

Der Spröddbruch tritt als Trennbruch senkrecht zur größten Hauptspannung ein. Bei spröden Werkstoffen liegt die maximal ertragbare Druckspannung weit höher als die maximale Zugspannung.

7.4.2 Die Schubspannungshypothese

Die Schubspannungshypothese gilt für duktile Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze. Nach dieser Hypothese ist das Überschreiten der Gleitfestigkeit durch die größte wirkende Schubspannung für das Werkstoffversagen maßgebend. Der Scherbruch durch Fließen tritt in Richtung der Hauptschubspannung auf. Folgender Zusammenhang gilt:

$$\tau_v = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

Die Schubspannungshypothese stellt eine vorsichtigere Abschätzung als die Gestaltänderungsenergiehypothese dar.

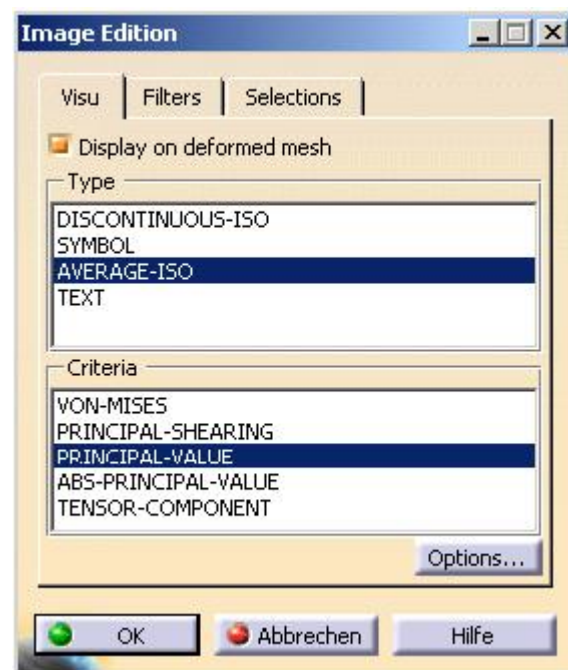
7.4.3 Die Gestaltänderungsenergiehypothese

Diese Hypothese (GEH) wurde bereits im Kapitel der VonMises-Vergleichsspannungen genauer beschrieben.

Werden nun die Hauptspannungen in der Darstellung 'Average-ISO' gewählt, erhält man folgende Selektionskriterien:

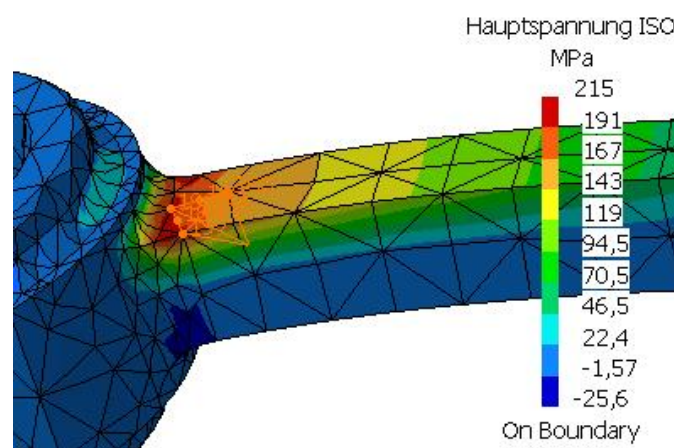
7 Auswertung der Ergebnisse

Darstellungskriterien für
die Hauptspannungen



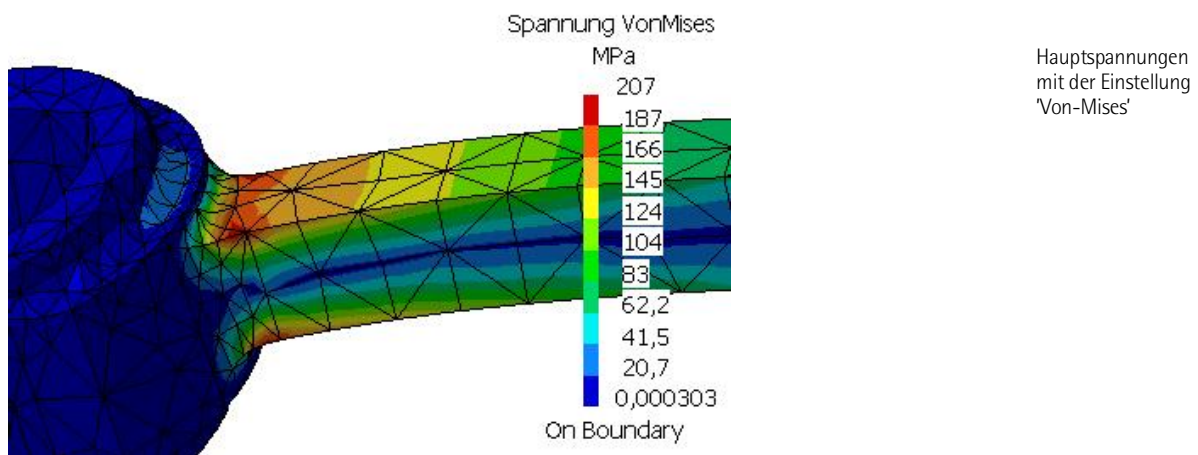
Standardmäßig wird das Kriterium 'Principal-Value' (Darstellung der drei Hauptnormalspannungen) angeboten.

Hauptspannungen mit der
Einstellung 'Principal-Value'



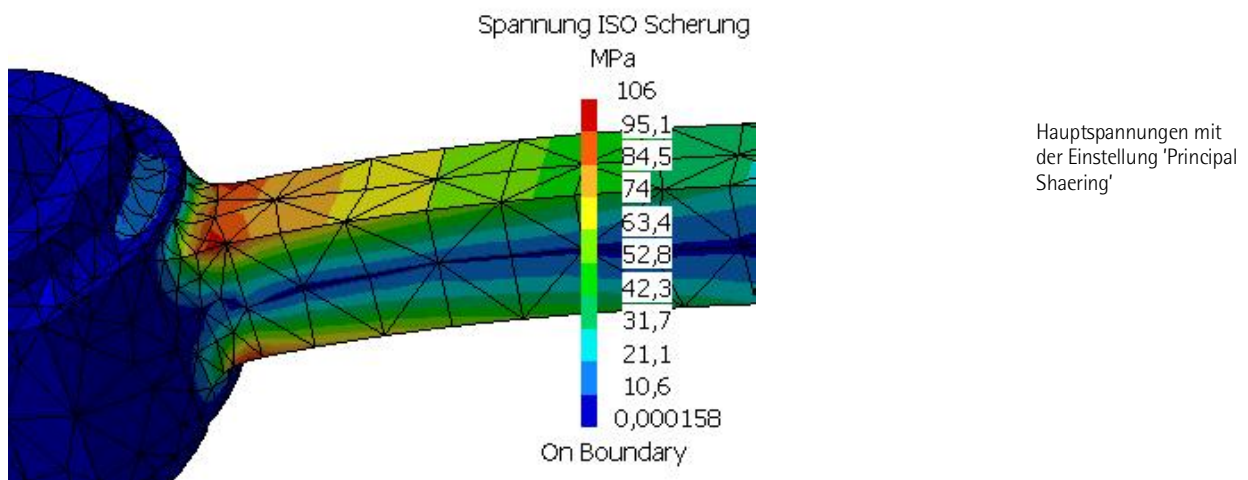
7.4 Darstellung der Hauptspannungen

Die Einstellung 'Von-Mises' ergibt die Vergleichsspannungen nach der GEH:



Man sieht, dass in diesem Fall keine Unterscheidung in Zug- und Druckspannungen erfolgt. Dasselbe Ergebnis erhält man nach Aufruf der VonMises-Vergleichsspannungen.

Die Einstellung 'Principal-Shearing' ergibt die auftretenden Scherspannungen:

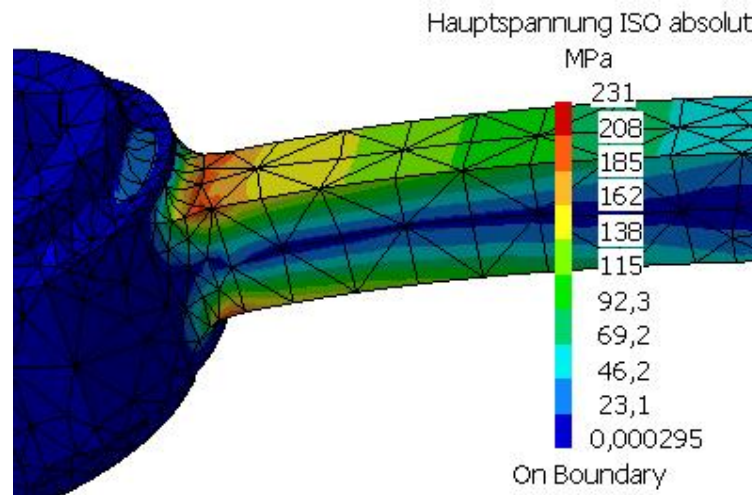


Bei der vorliegenden Belastung liegen die Scherspannungen in einem wesentlich niedrigeren Bereich.

7 Auswertung der Ergebnisse

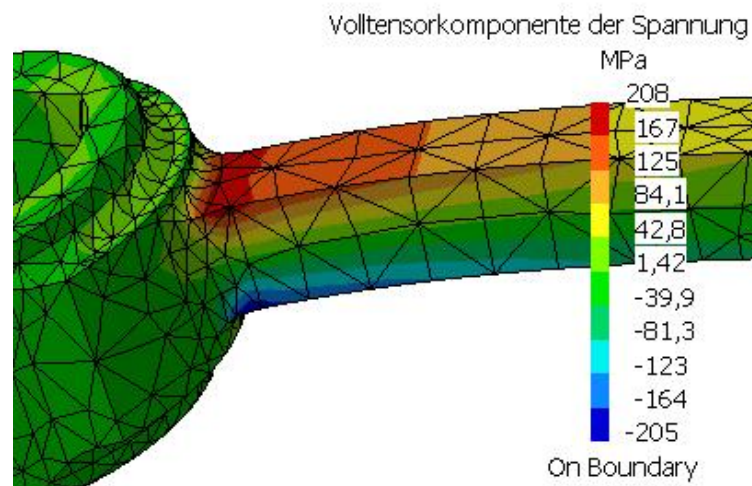
Mit der Einstellung 'ABS-Principal-Value' erhält man die absoluten Werte der Hauptspannungen ohne Unterscheidung hinsichtlich des Vorzeichens:

Hauptspannungen mit der Einstellung 'ABS-Principal-Value'



Schlussendlich führt die Option 'Tensor-Component' zu einer Darstellung der Volltensorkomponenten der Spannungen:

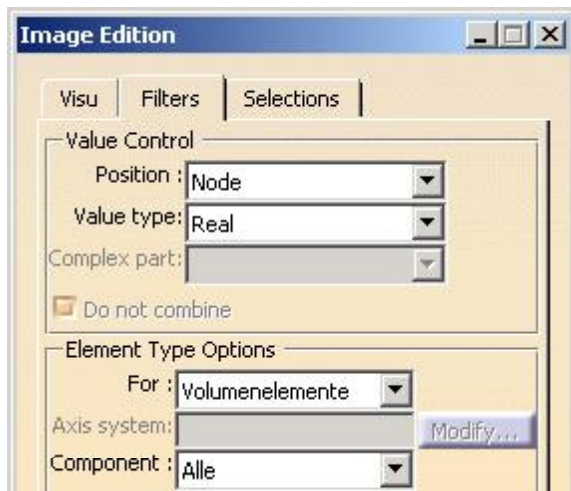
Hauptspannungen mit der Einstellung 'Tensor-Component'



Hier wird wieder in einen Zug- und Druckbereich unterschieden.

7.4 Darstellung der Hauptspannungen

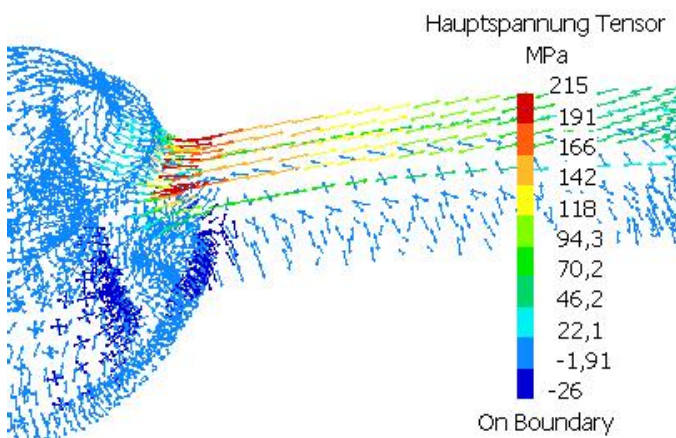
Zusätzlich gibt es im Bereich der Hauptspannungen die Möglichkeit, Filter zu setzen, um die kritischen Spannungen hervorzuheben. Dies geschieht mit der Kartei 'Filters':



Filterdefinition für die Hauptspannungen

Der Filter 'Alle' ist standardmäßig gesetzt und stellt die drei Hauptnormalspannungen dar (siehe standardmäßige Darstellung).

Der Filter C1 ergibt eine Darstellung der 1.Hauptnormal-spannung je Knoten (überwiegende Zugspannungen). Es empfiehlt sich hier die Einstellung 'Symbol' zur Visualisierung, um auch die Richtung zu erkennen:

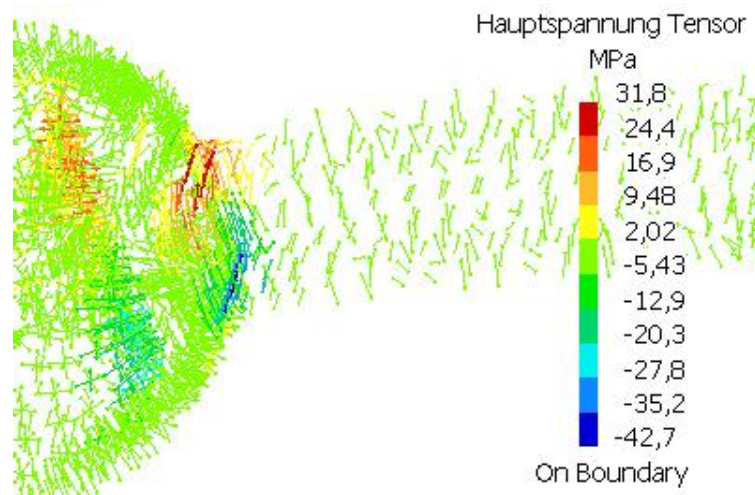


Darstellung der Hauptnormalspannungen mit Filter C1 (Zugspannungen)

7 Auswertung der Ergebnisse

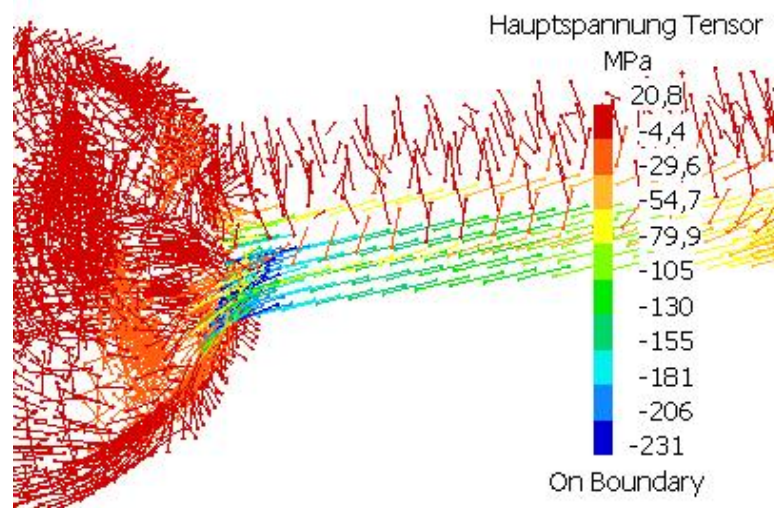
Der Filter C2 führt zu einer Darstellung des mittleren Werts der Hauptnormalspannungen (2.Hauptspannung) und ist nicht sehr aussagekräftig:

Darstellung der Hauptnormalspannungen mit Filter C2



Der Filter C3 stellt die 3.Hauptnormalspannung je Knoten dar. Dies sind die überwiegenden Druckspannungen:

Darstellung der Hauptnormalspannungen mit Filter C3 (Druckspannungen)



Man sieht auch in dieser Darstellung sehr schön die Richtung, in der die Druckspannungen wirken.

7.5 Darstellung der Genauigkeit

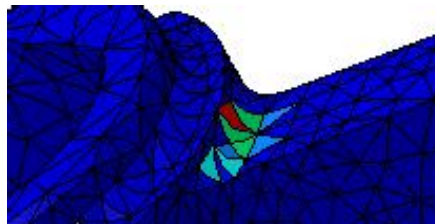
Weiters ist auch eine Kombination der Filter möglich, nämlich C1C2, C1C3 und C2C3, jedoch nur in der symbolischen Darstellungsmethode.

7.5 Darstellung der Genauigkeit

Die Darstellung der Genauigkeit oder die Fehlerabschätzung ist ein Maß für die Qualität der Berechnung. Dabei wird die Gesamtdehnungsenergie des betrachteten Bauteils aufgrund der Verformung mit der Energie durch die Einwirkung der äußeren Lasten ins Verhältnis gesetzt. Die Fehlerangabe darf allerdings nicht dazu verwendet werden, die Spannungsabweichung prozentuell zu korrigieren. Durch die Darstellung der Fehlerdehnungsenergie pro Element kann jedoch eine Übersicht der Fehlerbereiche gegeben werden. Dazu ist folgendermaßen vorzugehen:



Genauigkeit

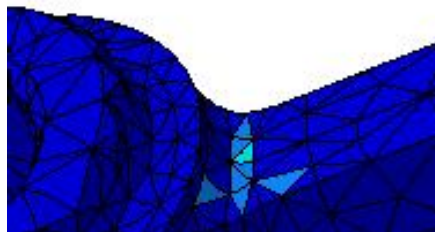


Darstellung der Genauigkeit für die einzelnen Elemente

In der Darstellung der Fehlerenergie sieht man kritische Elemente im Bereich des Übergangsradius. Eine erneute Berechnung mit einer neu definierten Adaptivität kann diese Elemente verbessern:



Neue Adaptivität



Durchführung einer neuen Berechnung zur Verbesserung der Elementqualität

Die Berechnungsgrundlage für die Fehlerabschätzung kann folgendermaßen erfolgen:

Prozentueller Fehler: $P = 1/(\sqrt{1 + (1/R)}) * 100$ in Prozent

7 Auswertung der Ergebnisse

Mit: $R = \Sigma (dE_e/E_g)$

Dabei ist: $dE_e \rightarrow$ Fehlerdehnungsenergie pro Element

$E_g \rightarrow$ Gesamtdehnungsenergie des Bauteils

Die Fehlerdehnungsenergie wird bestimmt auf Basis von geglätteten Spannungen nach dem Verfahren von Zienkiewicz.

7.6 Analysetools

Die Icons dieser Symbolleiste dienen zur weiteren Auswertung und Analyse der Ergebnisse. Folgende Funktionen sind dabei verfügbar:



Animieren



Schnittebenenanalyse



Maßstabsfaktor der Verformung



Extremwert bei Bild



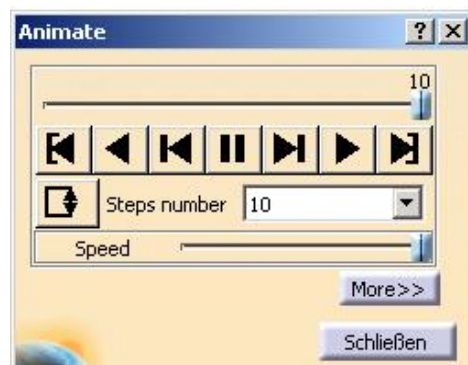
Informationen



Bildlayout

7.6.1 Animieren

Mit diesem Befehl kann sowohl die Darstellung der Spannungen als auch der Verformungen animiert werden. Nach dem Aufruf des Icons erhält man folgendes Fenster:

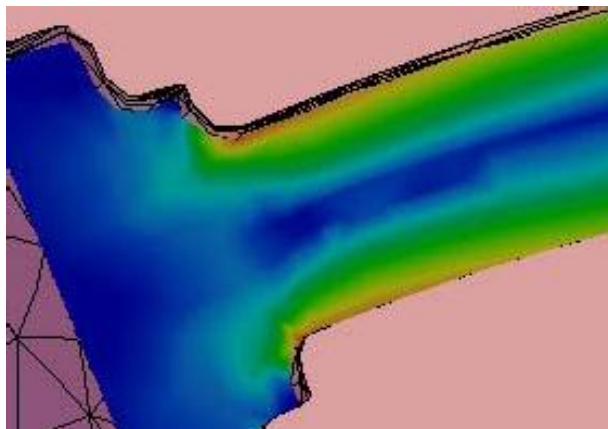


Eingabefenster bei der Animation

Dabei kann die Geschwindigkeit sowie die Anzahl der Schritte variiert werden. Die übrigen Icons in diesem Fenster sind ohnehin selbsterklärend.

7.6.2 Schnittebenenanalyse

Mit Hilfe dieses Icons kann auch der Spannungsverlauf innerhalb eines Bauteils sichtbar gemacht werden. Nach Aufruf des entsprechenden Icons kann die Ebene über den Kompass positioniert bzw. verschoben und gedreht werden:



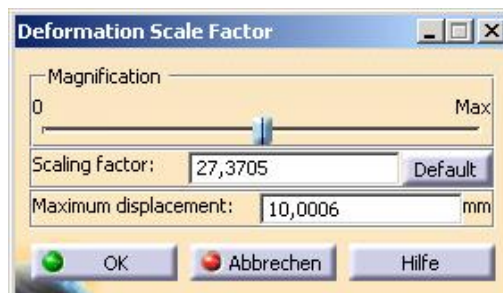
Darstellung des Spannungsverlaufs innerhalb eines Bauteils

7 Auswertung der Ergebnisse

7.6.3 Maßstabsfaktor der Verformung

Mit diesem Befehl kann die Höhe der Überzeichnung bei der Darstellung des verformten Netzes, der Spannungen sowie der Verformungen eingestellt werden. Nach Aufruf des Icons erscheint folgendes Eingabefenster:

Parameter zur Festlegung der Skalierung sowie der Verformung

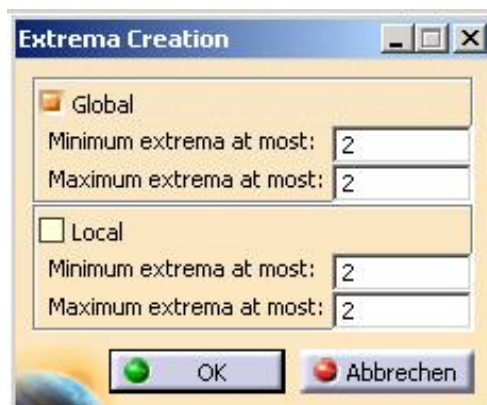


Es wird automatisch ein aussagekräftiger Wert für die Skalierung (Scaling factor) sowie für die Darstellung der Verformung (Maximum displacement) gewählt. Die Werte können jedoch manuell verändert sowie durch einen Klick auf den Knopf 'Default' auf die Ausgangswerte zurückgesetzt werden.

7.6.4 Extremwert bei Bild

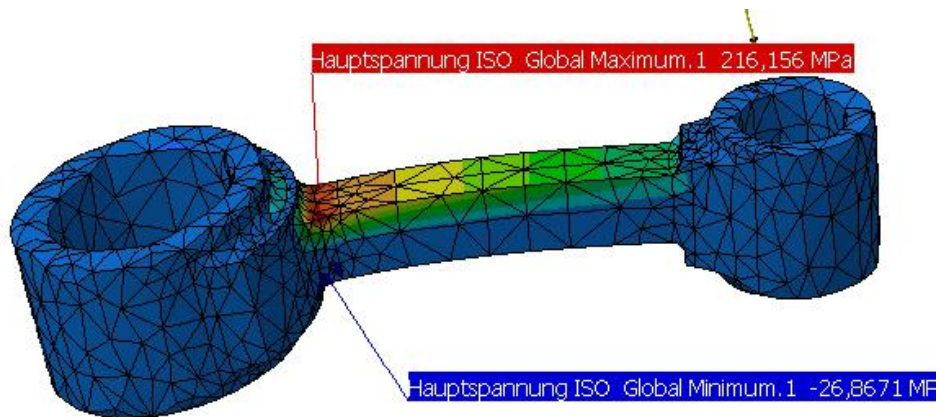
Damit lassen sich die Extremwerte der gerade visualisierten Spannungsdarstellung einblenden. Folgende Vorgangsweise ist zu befolgen:

Aufruf der Extremwerte eines Bilds



Danach erhält man beispielhaft folgende Darstellung:

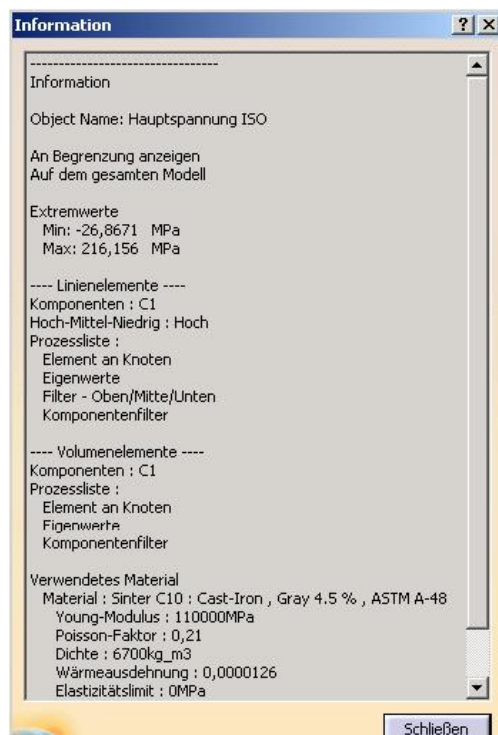
7.6 Analysetools



Darstellung der beiden
Extremwerte Maximum
und Minimum

7.6.5 Informationen

Nach einer Auswahl dieses Icons und der gewünschten Darstellung im Strukturbaum erhält man Informationen der folgenden Art:



Informationen zu einer
ausgewählten Darstel-
lung

7 Auswertung der Ergebnisse

7.6.6 Bildlayout

Mit Hilfe dieses Icons können mehrere Darstellungen zugleich eingeblendet und entlang einer gewünschten Achse verteilt werden. Dazu ist wie folgt vorzugehen:

Im ersten Schritt sind im Strukturbaum die gewünschten Darstellungsvarianten durch Aufruf des Kontextmenüs zu aktivieren:

Aktivieren der gewünschten Ansichten im Strukturbaum

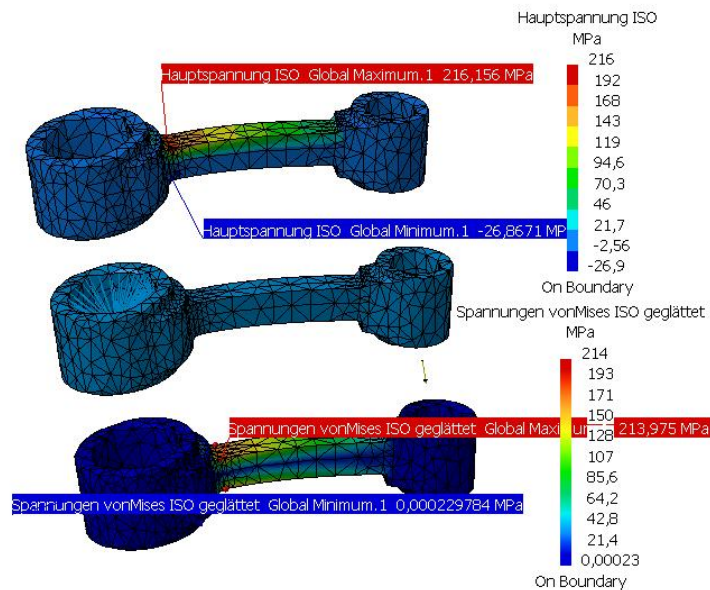


Danach ist das Icon für Bildlayout zu wählen:

Auswahl einer Achse, entlang derer ausgerichtet wird



Gleichzeitige Darstellung von Hauptspannung, verformtem Netz und Vergleichsspannungen



7.7 Symbolleiste Analyseergebnisse

Alle in diesem Kapitel gezeigten Darstellungsvarianten erhalten Sie auch nach Berechnung der Datei *'Pleuel_kombinierter_prozess.CATAnalysis'*.

7.7 Symbolleiste Analyseergebnisse

Diese Icons dienen zur Erstellung eines Berichts der durchgeführten FEM-Analyse.



Bericht der Basisanalyse



Verbesserter Bericht



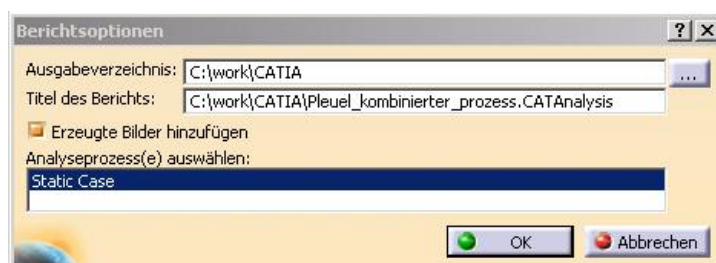
Protokoll der Berechnungen



Listenbericht

7.7.1 Bericht der Basisanalyse

Mit diesem Icon erhält man einen Basisbericht der durchgeführten FEM-Analyse im HTML-Format. Dabei ist wie folgt vorzugehen:



Optionen bei der Erstellung eines Berichts

Im Eingabefeld ist das gewünschte Ausgabeverzeichnis sowie ein Titel des Berichts anzugeben. Bei mehreren durchgeführten Prozessen ist der jeweilige Prozess zu se-

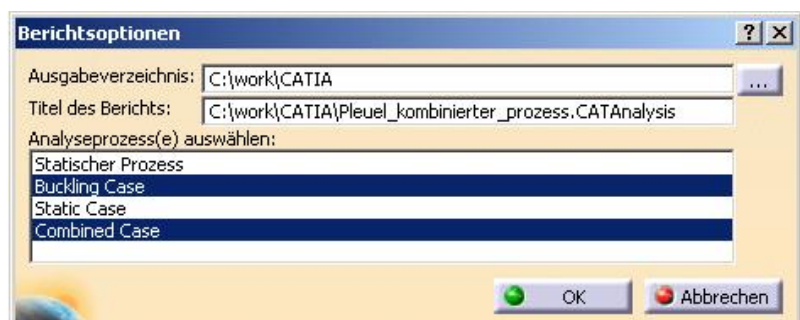
7 Auswertung der Ergebnisse

lektieren. Der erzeugte Bericht kann dann sofort im Netscape bzw. Internet Explorer eingesehen werden.

7.7.2 Verbesserte Bericht

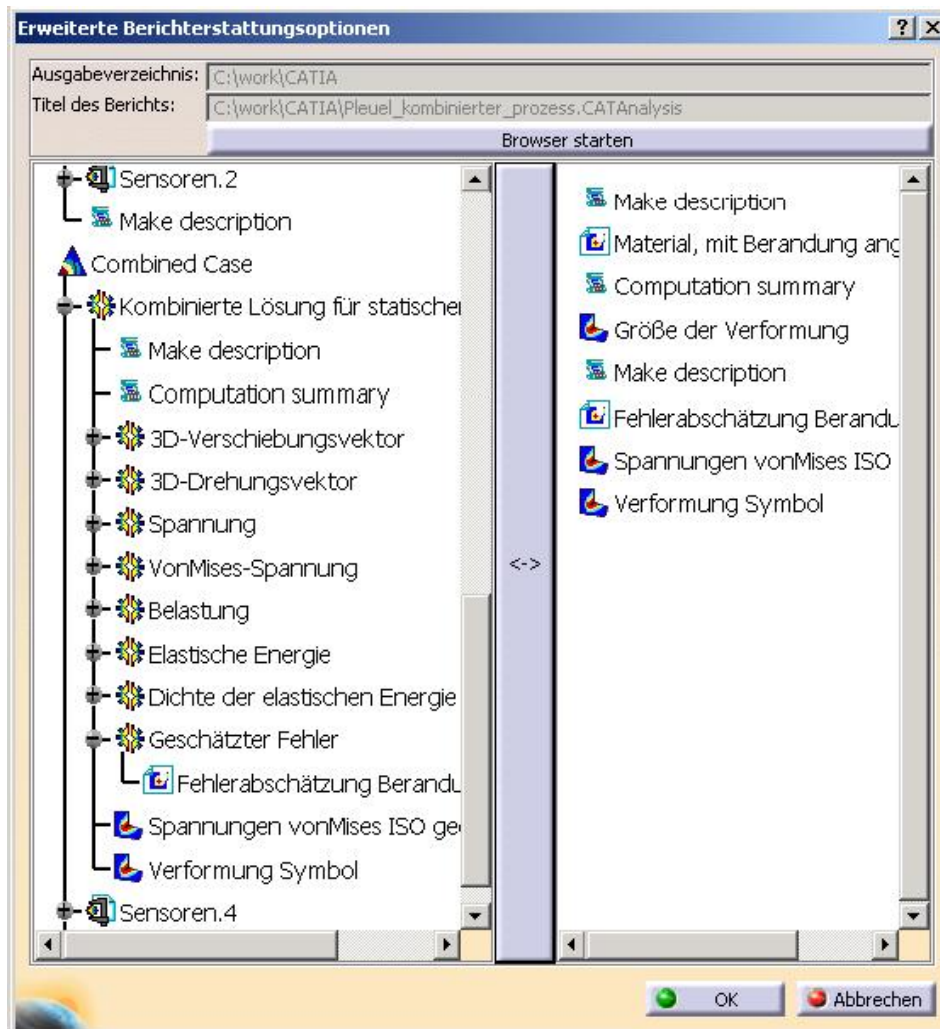
Mit dieser Option kann man das Layout des erzeugten Berichts selbst in gewissen Grenzen beeinflussen. Die Vorgangsweise entspricht der vorherigen:

Erstellung eines verbesserten Berichts für ausgewählte Prozesse



Nach der Definition des Output-Verzeichnisses und des Berichtsnamens sind die gewünschten Prozesse zu selektieren. Anschließend erscheint ein weiteres Fenster zur Konfiguration des Berichts. In diesem Fenster sind im linken Teil die gewählten Prozesse ersichtlich. Durch einen Doppelklick auf einen entsprechenden Eintrag (oder durch Einfachklick auf '+') wird der Strukturbaum weiter aufgeklappt. Elemente in der untersten Hierarchiestufe können durch Selektion des Pfeiles in der Mitte des Bilds nach rechts verschoben werden. Alle Elemente, die nach rechts verschoben wurden, erscheinen in dem anschließend generierten Bericht. Somit kann der User aus den angebotenen Möglichkeiten einen Bericht nach seinen Wünschen und Vorstellungen zusammenstellen. Mit dem Icon 'Browser starten' wird der Bericht aufgerufen.

7.7 Symbolleiste Analyseergebnisse



Auswahlfenster zur
Erstellung eines
verbesserten Berichts

Nach der Konfiguration der gewünschten Inhalte und Aufruf des Standardbrowsers hat der Bericht beispielhaft folgendes Aussehen:

7 Auswertung der Ergebnisse

Beispiel für einen selbst konfigurierten Bericht

C:\work\CATIA\Pleuel_kombinierter_prozess.CATAnalysis

Knoten und Elemente : Make description

Vernetzung:

Einheit	Größe
Knoten	9297
Elemente	5319

Elementtyp:

Konnektivität	Statistik
SPIDER	1 (0,02%)
TE10	5318 (99,98%)

7.7.3 Protokoll der Berechnungen

Mit diesem Icon kann der Verlauf der Rechenschritte, und zwar die Adaptivität, die Anzahl der Elemente und die Anzahl der Knoten über den Iterationsschritten dargestellt werden. Genaueres dazu findet sich im Kapitel 6.3.

7.7.4 Listenbericht

Mit diesem Befehl wird das Verzeichnis ausgewählt, in welches die Berichte abgelegt werden. Nach Aufruf des Icons erscheint folgendes Bild:

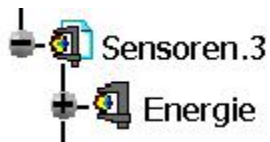
Verzeichnis für Berichte festlegen



Nun kann man das entsprechende Verzeichnis wählen, in das die Daten gespeichert werden.

7.8 Sensoren

Es besteht eine weitere Möglichkeit der Auswertung über die Definition von Sensoren. Der Aufruf dazu erfolgt über den Strukturbaum:



Erzeugung eines Sensors über das Kontextmenü

Durch Auswahl des Eintrags 'Sensoren' und Aufruf des Kontextmenüs können folgende Sensoren erzeugt werden:

- Reaktionssensor
- Globaler Sensor
- Lokaler Sensor

7.8.1 Reaktionssensor

Ein Reaktionssensor dient zur Berechnung der Reaktionskräfte bzw. Reaktionsmomente für die selektierte Randbedingung.

Dabei ist folgendermaßen vorzugehen:

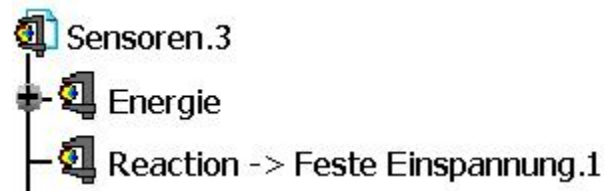


Definition eines Reaktionssensors für die feste Einspannung

Im Auswahlfenster ist die entsprechende Randbedingung, für die der Sensor erzeugt werden soll, zu selektieren, worauf im Strukturbaum der Sensor erscheint:

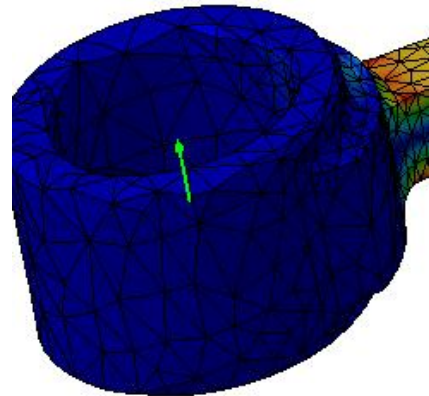
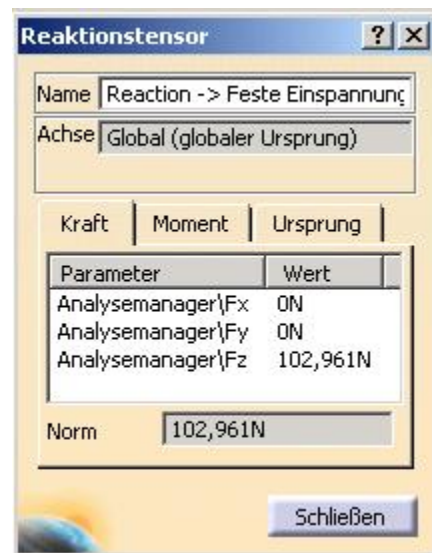
7 Auswertung der Ergebnisse

Eintrag des Sensors
im Strukturbaum



Ein Doppelklick auf den Eintrag im Strukturbaum ergibt die entsprechenden Werte:

Berechnete Kräfte für den
gewählten Reaktionssensor



Der resultierende Vektor wird auch im Zeichenbereich dargestellt.

Reaktionssensoren können für alle Randbedingungen ermittelt werden.

7.8.2 Globaler Sensor

Der Aufruf des globalen Sensors erfolgt gleich wie beim Reaktionssensor über den Strukturbaum. Folgende Auswahlmöglichkeiten stehen im Anschluss zur Verfügung:



Auswahlliste beim
globalen Sensor

Aus der Liste der möglichen globalen Sensoren ist der gewünschte Sensor zu wählen, der nach Bestätigung mit der OK-Taste erzeugt wird. Ein Aufruf über den Strukturbaum bringt beispielhaft folgendes Ergebnis:



Auswertung des
globalen Sensors
'Maximum Displacement'



Die angebotene Auswahlliste zur Erzeugung eines globalen Sensors variiert je nach durchgeführtem Prozess.

7.8.3 Lokaler Sensor

Damit kann ein Sensor auf einer lokalen Stützgeometrie erzeugt werden. Nach Aufruf des lokalen Sensors bietet sich dem User wiederum eine Auswahlliste, je nach durchgeführtem Prozess:

7 Auswertung der Ergebnisse

Auswahlmöglichkeiten
für einen lokalen Sensor

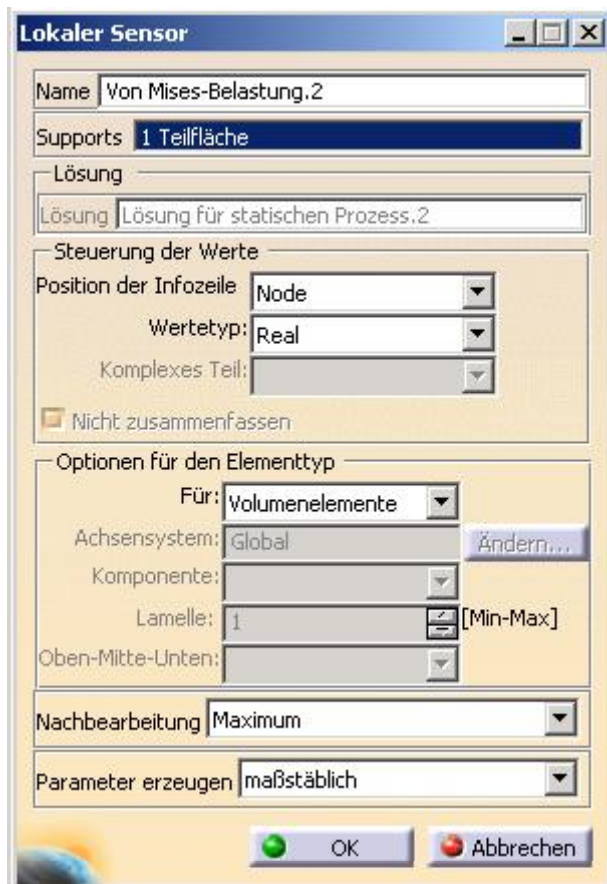


Eintrag des lokalen Sensors
im Strukturbaum

Nach der Selektion des gewünschten Eintrags erscheint der lokale Sensor im Strukturbaum:



Aufgrund des Rufzeichens ist erkennbar, dass noch weitere Aktionen notwendig sind. Ein Doppelklick im Strukturbaum bringt ein weiteres Eingabefenster, in dem zuerst ein Support zu wählen ist. Dies erfolgt am besten im 'No-Show-Bereich', in den das Konstruktionsteil bei einer FEM-Berechnung automatisch verschoben wird. Hier können Punkte, Kanten, Flächen und Körper selektiert werden. Weiters kann definiert werden, ob der Sensor für den Knoten (Node) oder das Elementzentrum (Center of element) definiert werden soll. Im Eingabefeld 'Nachbearbeitung' ist zu definieren, ob ein maximaler, durchschnittlicher oder minimaler Wert erzeugt werden soll. Schlussendlich ist bei 'Parameter erzeugen' die Option maßstäblich zu wählen, um eine Berechnung zu ermöglichen:



Definition der Parameter
zur Erzeugung eines
lokalen Sensors

Danach ergibt sich folgendes Aussehen des lokalen Sensors im Strukturbaum:



Aktualisierung des Sensors
über das Kontextmenü

Durch Aufruf des Kontextmenüs und Auswahl des Eintrags 'Sensor aktualisieren' wird die eigentliche Berechnung durchgeführt. Die Auswertung erfolgt danach über einen Doppelklick auf den dargestellten Parameter.

7 Auswertung der Ergebnisse

Parameterwert des
lokalen Sensors



In diesem Fall wurde beispielhaft die maximale VonMises-Vergleichsspannung für eine selektierte Teilfläche ermittelt.

Die Auswahlliste für die Erzeugung eines lokalen Sensors ist entsprechend umfangreich und ermöglicht dem Benutzer eine genaue Auswertung der Berechnungsergebnisse.

7.8.4 Werte für Sensoren anzeigen

Um im Strukturbaum die Werte für die erzeugten Sensoren direkt angezeigt zu erhalten, ist folgende Einstellung notwendig:

Direktes Anzeigen der
Sensoren im Struktur-
baum ermöglichen



Unter 'Tools' und 'Optionen' ist bei 'Parameter und Messungen' in der Kartei 'Ratgeber' die Option 'Mit Wert' für die Strukturbaumsicht zu wählen.

8 Verfügbare Finite Elemente

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über die in der GPS-Arbeitsumgebung verfügbaren finiten Elemente gegeben. Die FEM-Elemente können grob in 1D-, 2D- und 3D-Elemente eingeteilt werden. Welche Elemente zum Einsatz kommen, richtet sich nach dem entsprechenden Anwendungsfall.

8.1 1D-Elemente (Balkenelemente)

In der GPS-Arbeitsumgebung sind Beam-Elemente als eindimensionale Elemente vorhanden. Das Beam-Element (Balkenelement) ist ein Linienelement mit zwei Knoten:



Aufbau eines Beam-Elements

Das Balkenelement verfügt über sechs Freiheitsgrade pro Knoten (drei translatorische sowie drei rotatorische) und verhält sich elastisch.

8.1.1 Vorgangsweise bei der Vernetzung

Die Vernetzung mit Beam-Elementen ist bei Drahtgittergeometrien sinnvoll. Es können jedoch keine Skizzen vernetzt werden.

Die Vorgangsweise bei der Vernetzung und Berechnung mit Balkenelementen soll an einem Beispiel veranschaulicht werden. Dazu soll ein I-Träger mit einer Länge von einem Meter mit Balkenelementen vernetzt werden. Öffnen Sie dazu die Datei *'I_Traeger.CATPart'*.



Achse des I-Trägers zur Vernetzung mit Balkenelementen

Danach starten Sie wiederum die GPS-Arbeitsumgebung. Die Vernetzung mit Balkenelementen erfolgt mit folgendem Icon:

8 Verfügbare Finite Elemente



Vernetzung mit Trägern

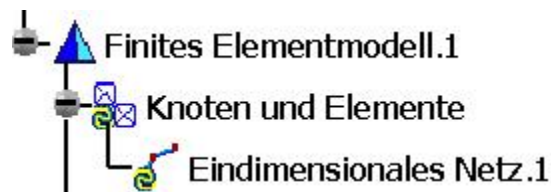
Danach ist die Linie, die die Achse des Trägers darstellt, zu selektieren, worauf ein weiteres Fenster erscheint:

Parameter für eine Vernetzung mit Balkenelementen



In diesem Fenster ist die Elementgröße anzugeben. In diesem Fall wählen Sie 10 mm. Dann aktivieren Sie die Steuerung des Durchhangs (SAG-Wert) und übernehmen Sie die voreingestellten Parameter. Daraufhin erfolgt eine Vernetzung des Bauteils, die auch im Strukturbaum ersichtlich ist:

Darstellung der Vernetzung im Strukturbaum



8.1.2 Zuordnung von Eigenschaften

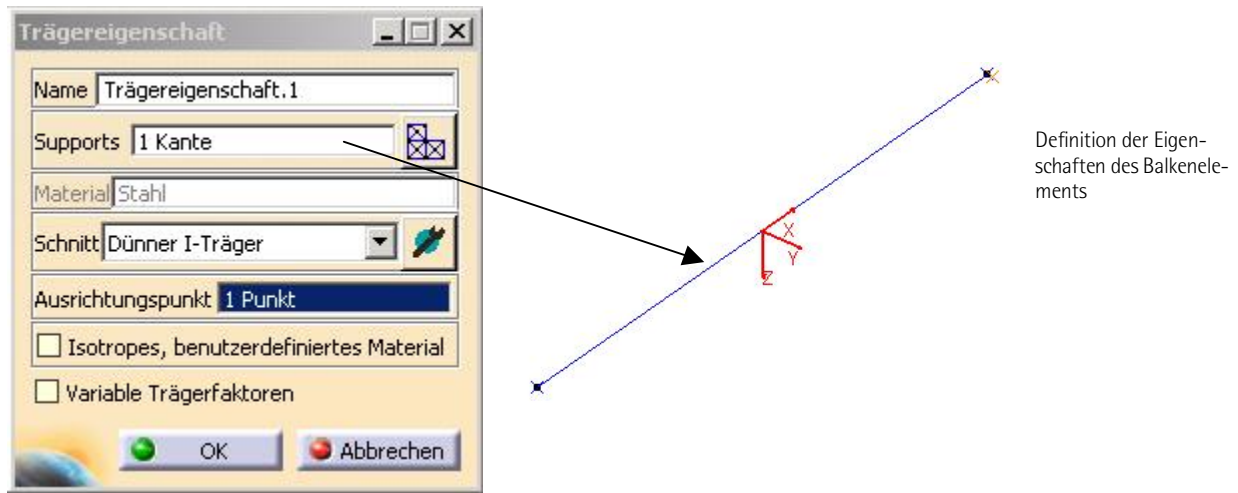
Es ist generell notwendig, den Balkenelementen entsprechende Eigenschaften des gewünschten Trägers zuzuordnen. Dies wird mit folgendem Icon durchgeführt:



Trägereigenschaft

8.1 1D-Elemente (Balkenelemente)

Nach Aufruf dieses Icons erscheint ein weiteres Eingabefenster zur Definition der Trägereigenschaften:



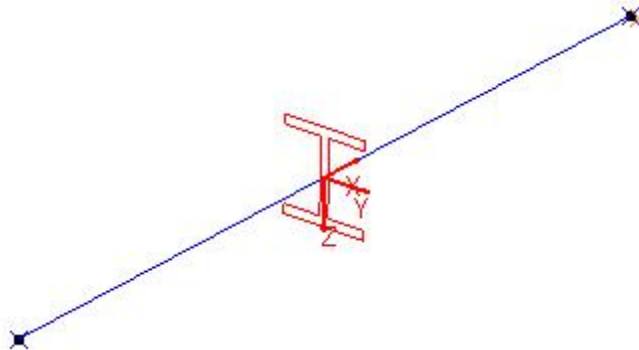
Als Stützelement ist die Linie (Achse) zu selektieren, im Feld 'Schnitt' ist im Pull-Down Menü der Eintrag 'Dünner I-Träger' auszuwählen. Als Ausrichtungspunkt ist der Punkt mit den Koordinaten (0/10/0) zu wählen. Die Y-Achse wird stets normal auf diesen Ausrichtungspunkt angenommen. Dann ist im Eingabefenster folgendes Icon zu selektieren:



In diesem Fenster können Sie die gewünschten Abmessungen für den I-Träger eingeben und erhalten damit folgendes Resultat:

8 Verfügbare Finite Elemente

Träger nach durchgeführter Zuordnung der Eigenschaften des Balkenelements

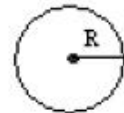


Generell sind in der GPS-Arbeitsumgebung folgende Balkenquerschnitte einsetzbar:

Mögliche Balkenquerschnitte

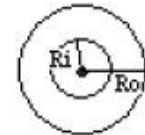
Cylindrical:

- Radius: R



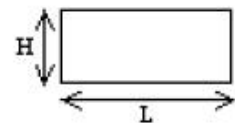
Tubular:

- Outside Radius: R_o
- Inside Radius: R_i



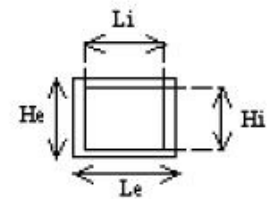
Rectangular:

- Length (Y): L
- Height (Z): H



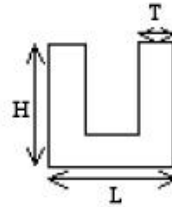
Thin Box Beam:

- Exterior Length (Y): L_e
- Exterior Height (Z): H_e
- Interior Length (Y): L_i
- Interior Height (Z): H_i

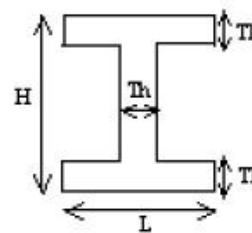


8.1 1D-Elemente (Balkenelemente)

- Thin U-Beam:
- Global Length (Y): L
 - Global Height (Z): H
 - Global Thickness: T

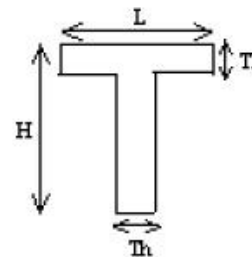


- Thin I-Beam:
- Global Length (Y): L
 - Associated Thickness: T_l
 - Global Height (Z): H
 - Associated Thickness: T_h

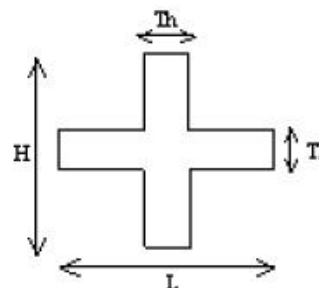


Mögliche Balken-
querschnitte

- Thin T-Beam:
- Global Length (Y): L
 - Associated Thickness: T_l
 - Global Height (Z): H
 - Associated Thickness: T_h



- Thin X-Beam:
- Global Length (Y): L
 - Associated Thickness: T_l
 - Global Height (Z): H
 - Associated Thickness: T_h



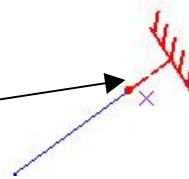
Darüber hinaus gibt es auch noch die Möglichkeit, einen benutzerdefinierten Querschnitt zu verwenden.

8 Verfügbare Finite Elemente

8.1.3 Berechnung mit Balkenelementen

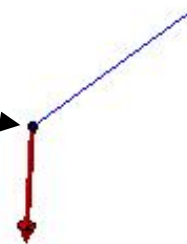
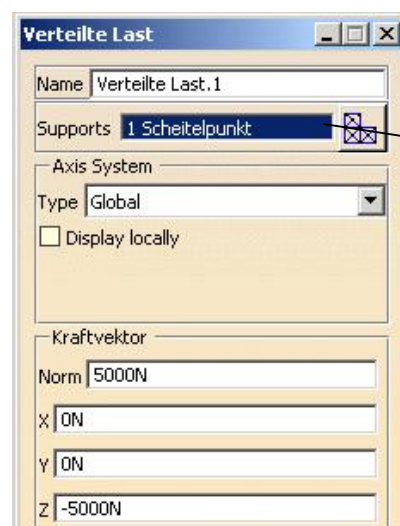
Die Berechnung wird analog zu den anderen schon erläuterten Beispielen durchgeführt. Zuerst ist eine Definition der Lagerung des I-Trägers notwendig. Wählen Sie eine feste Einspannung an einem Ende des Trägers:

Definition einer festen Einspannung an einem Ende des Balkens



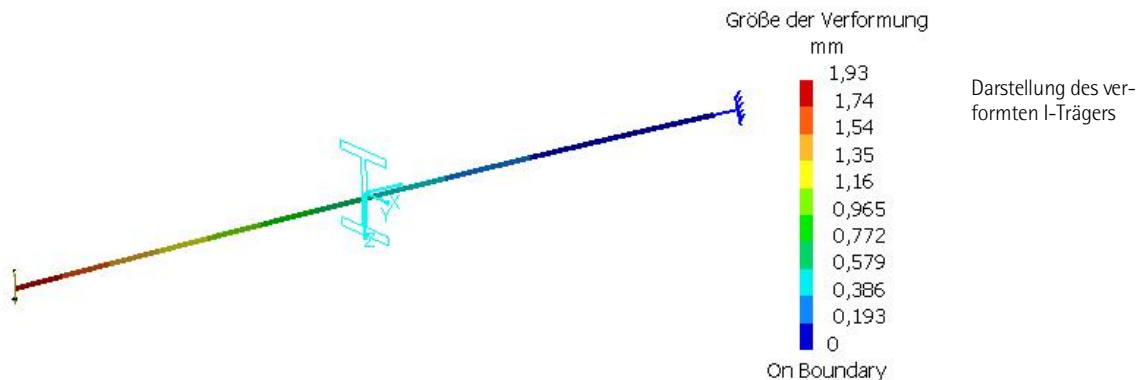
Als Belastung definieren wir eine verteilte Last von 5000N am anderen Ende des Trägers:

Definition einer Belastung von 5000N am anderen Ende des Balkens



8.2 2D-Elemente (Schalenelemente)

Damit kann die Berechnung durchgeführt werden. Die Ergebnisse (Verformungen) sind im unten angeführten Bild ersichtlich:



Der I-Träger verformt sich unter dieser Last um 1,93 mm. Sie erhalten das angeführte Ergebnis auch mit der Datei '*I_Traeger.CATAnalysis*'. Diese Berechnung kann auch gut mit einer händischen Rechnung überprüft werden.

8.2 2D-Elemente (Schalenelemente)

In der GPS-Arbeitsumgebung sind dreieckige Schalenelemente (TR3S) verfügbar. Rechteckige Schalenelemente finden sich in der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools', auf die auch kurz eingegangen wird.

Die Schalenelemente sind bei der Berechnung von dünnwandigen Bauteilen einzusetzen, da eine Berechnung mit Tetraeder-Elementen aufgrund mathematischer Grenzen zu sehr ungenauen Ergebnissen führt. Es kommt aufgrund der Dünnwandigkeit und der Tatsache, dass nach Möglichkeit mit gleichseitigen Elementen gerechnet werden soll, zu einer starken Verzerrung der Tetraederelemente. Dies führt wiederum zu einer unzulässigen Versteifung der Geometrie, da sich die Volumenelemente nicht entsprechend an die Bauteiloberfläche anpassen können. Daher empfiehlt sich eine zweidimensionale Vernetzung mit dreieckigen oder rechteckigen Schalenelementen.

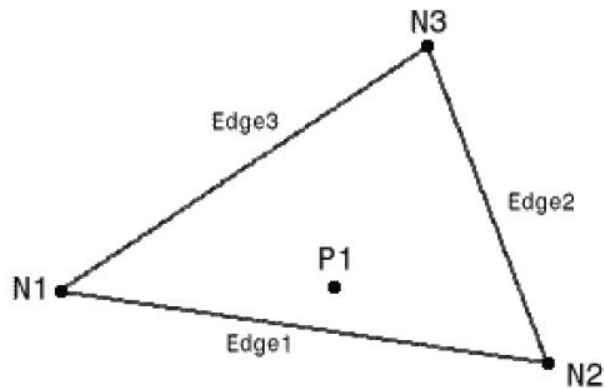
Bei den dreieckigen Schalenelementen kann in lineare und parabolische Elemente unterschieden werden.

Das lineare Dreieckselement

Der prinzipielle Aufbau dieser linearen Dreieckselemente (TR3S) ist der untenstehenden Abbildung zu entnehmen:

8 Verfügbare Finite Elemente

Prinzipieller Aufbau
des linearen
Dreieckselements

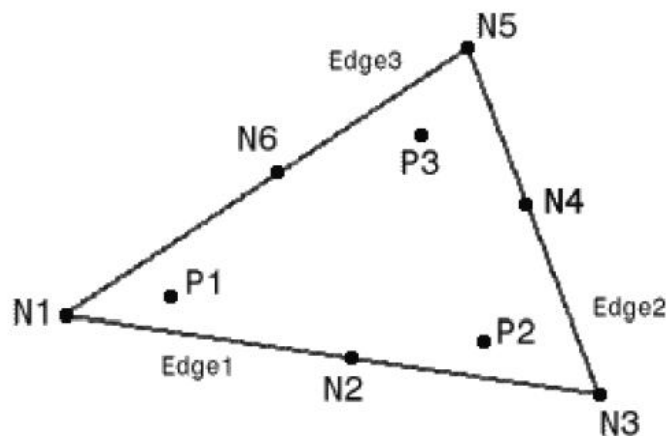


Das Schalenelement basierend auf der Reissnerschen Plattentheorie besteht aus drei Knoten mit jeweils sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische) je Knoten. Es verhält sich elastisch.

Das Parabolische Dreieckselement

Das parabolische Schalenelement (TR6S) ist prinzipiell folgendermaßen aufgebaut:

Prinzipieller Aufbau des
parabolischen Schalen-
elements



Es besteht aus sechs Knoten mit jeweils sechs Freiheitsgraden und verhält sich elastisch.

8.2 2D-Elemente (Schalenelemente)

8.2.1 Vorgangsweise bei der Vernetzung

Um eine Flächenkonstruktion mit dreieckigen Schalenelementen vernetzen zu können, sind vorbereitende Schritte notwendig:

- Die Flächenkonstruktion muss mit dem Icon 'Verbindung' in der Arbeitsumgebung 'Flächenerzeugung' zusammengefügt werden, bevor eine Berechnung erfolgen kann.
- In einem weiteren Schritt muss diese Verbindung über 'Tools' und 'Externe Ansicht' selektiert werden, um eine Vernetzung mit Schalenelementen in der Arbeitsumgebung GPS zu ermöglichen.

Die Vernetzung selbst erfolgt mit folgendem Icon:



Octree-Dreiecksvernetzung

In einem Übungsbeispiel soll die soeben beschriebene Vorgangsweise gefestigt werden. Öffnen Sie dazu die Datei *Leftwing.CATPart*, es handelt sich um die Tragfläche eines Sportflugzeugs. Die notwendige Verbindung der Loft-Flächen wurde bereits erzeugt:



Erzeugen einer Verbindung

Damit kann nun die externe Ansicht definiert werden:



Definition der externen Ansicht

Nun kann die Umgebung GPS gestartet werden. Hier selektieren Sie das Icon für die Vernetzung mit Dreieckselementen. Damit erhalten Sie ein weiteres Eingabefenster:

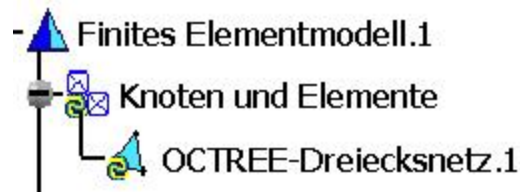
8 Verfügbare Finite Elemente

Parameter für die Vernetzung mit parabolischen Dreieckselementen



Nach der Bestätigung ist die Netzdefinition im Strukturbaum ersichtlich:

Eintrag des Netzes im Strukturbaum



8.2.2 Zuordnung der Eigenschaften

Auch bei den Schalenelementen ist es notwendig, eine Eigenschaft zu definieren. Hier bezieht sich die Eigenschaft auf die Dicke des dünnwandigen Bauteils. Die angegebene Wanddicke wird von der vernetzten Mittenebene in beide Richtungen mit dem halben Wert der Dicke aufgetragen. Standardmäßig wird die Wandstärke mit 1mm festgelegt.



Eigenschaft des Schalenelements

Geben Sie im darauf folgenden Eingabefenster die Wanddicke mit 2mm ein:

8.2 2D-Elemente (Schalenelemente)

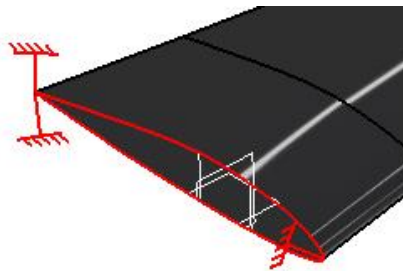


Wandstärke des
Schalenelements

Die Wandstärke wird auch im Zeichenbereich eingeblendet.

8.2.3 Berechnung mit Schalenelementen

Im nächsten Schritt sind die Randbedingungen zu definieren. Die Tragfläche wird an den zwei Begrenzungskanten als fix eingespannt betrachtet.

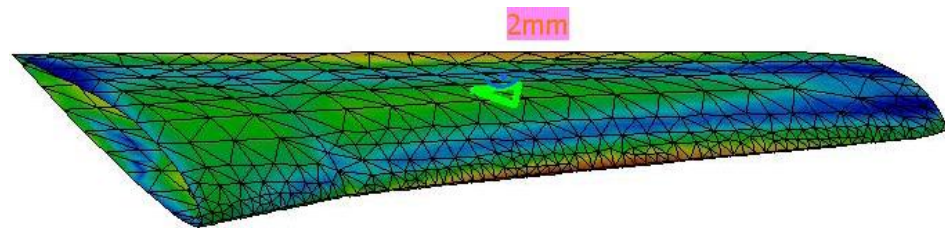


Feste Einspannung an
zwei Kanten

Nun ist noch eine Last aufzubringen und die Berechnung kann durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind wiederum mit der Datei 'Leftwing.CATAnalysis' zu überprüfen und zeigen folgendes Netz mit dreieckigen Schalenelementen:

8 Verfügbare Finite Elemente

Berechnung mit parabolischen Dreieckselementen



Die verwendeten dreieckigen Schalenelemente können sich sehr gut an die Fläche anpassen und liefern auch bessere Ergebnisse als Tetraeder-Elemente.

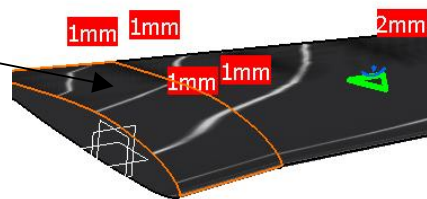
8.2.4 Definition veränderlicher Wandstärken

Es ist auch möglich, unterschiedliche Wandstärken zu definieren. Durch einen Aufruf des Kontextmenüs über den Eintrag 'Eigenschaft des Schalenelements' im Strukturbaum und Selektion der lokalen Eigenschaft des Schalenelements erhält man folgendes Eingabefenster:



Eigenschaft des Schalenelements.1

Definition einer lokalen Wandstärke



Hier kann nunmehr die lokale Wandstärke definiert werden. Weiters ist es möglich, einen Wandstärkenverlauf über eine Excel-Tabelle einzulesen.

8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)

8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)

In CATIA kann man auch viereckige Schalenelemente verwenden. Dies ist jedoch nur in der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools' möglich. Es folgt ein kurzer Einblick in diese Arbeitsumgebung.

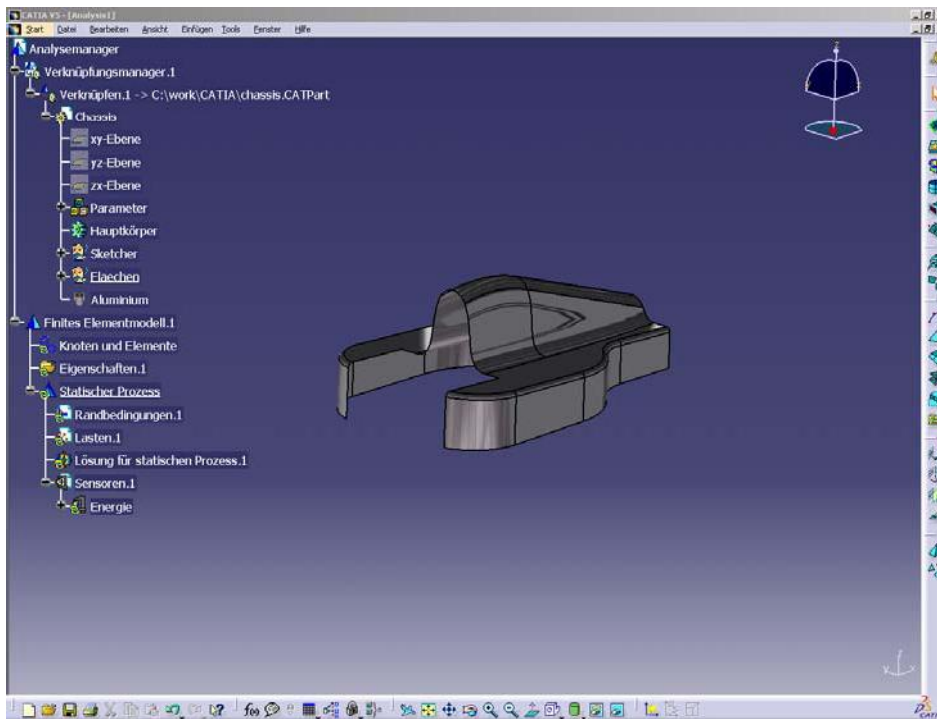
Gestartet wird diese Arbeitsumgebung in folgenden Varianten:



Starten der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools'

- Über das entsprechende Icon in den Favoriten
- Oder über Start Analyse & Simulation Advanced Meshing Tools

Die Materialzuordnung sollte bereits zuvor in der entsprechenden Konstruktionsumgebung erfolgen. Nach Aufruf der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools' bietet sich dem Benutzer folgende Oberfläche:

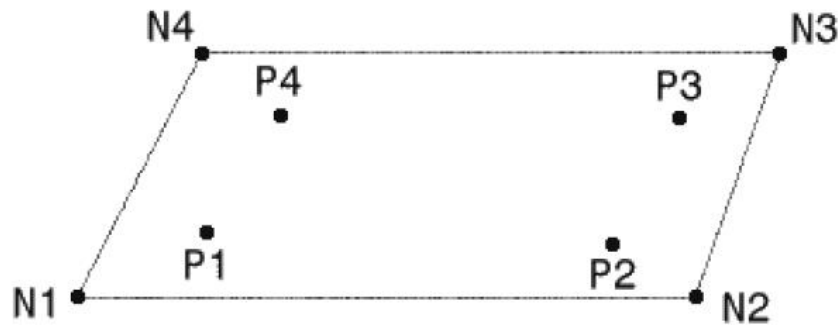


Oberfläche der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools'

8 Verfügbare Finite Elemente

Der Einsatz viereckiger Schalenelemente ist wiederum bei dünnwandigen Bauteilen sinnvoll. Prinzipiell sieht der Aufbau eines linearen viereckigen Schalenelements (QD4) folgendermaßen aus:

Aufbau des linearen viereckigen Schalenelements



Das Element besteht aus vier Knoten mit jeweils sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische). Das ebenfalls verfügbare parabolische viereckige Schalenelement (QD8) besteht aus acht Knoten. Beide Elemente sind vom Verhalten elastisch und basieren auf der Reissnerschen Plattentheorie.

8.3.1 Vernetzung mit viereckigen Schalenelementen

Der Vorgang der Vernetzung mit viereckigen Schalenelementen soll anhand eines Beispiels erläutert werden. Öffnen Sie dazu die Datei 'Chassis.CATPart'. Es handelt sich um eine reine Flächenkonstruktion, die vereinfacht das Chassis eines Rennwagens darstellt. Dieses Chassis soll nun mit parabolischen viereckigen Schalenelementen (QD8) vernetzt werden.

Nach dem Aufruf der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools' ist als Analysefall eine Frequenzanalyse zu selektieren.

Aufruf der Arbeitsumgebung



Dann ist in dieser Arbeitsumgebung das Icon 'Flächenvernetzung' zu selektieren:

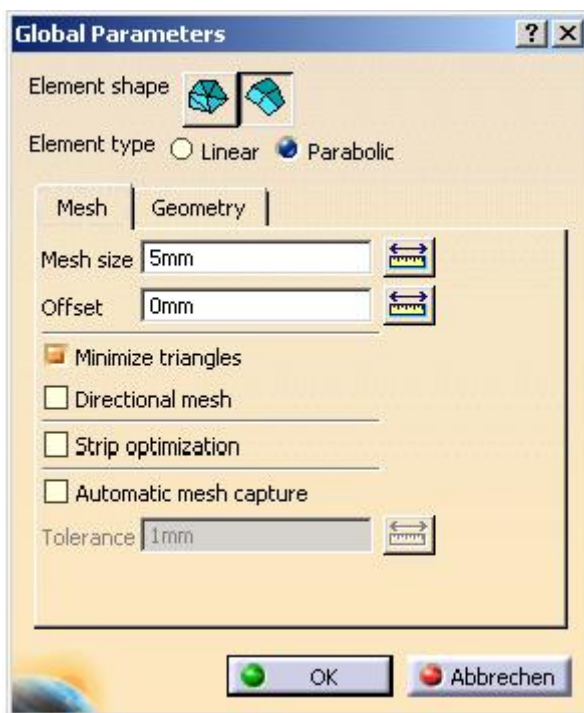
8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)



Flächenvernetzung

Aufruf der Flächenvernetzung

Wählen Sie nun den zu vernetzenden Flächenverband im Zeichenbereich oder im Strukturbaum. Daraufhin erscheint ein Eingabefenster zur Festlegung der Netzparameter:

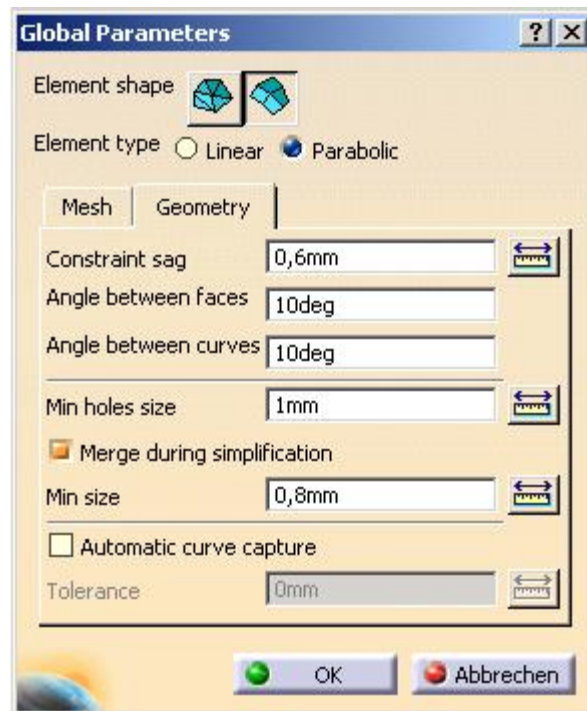


Parameter zur Vernetzung mit Schalenelementen in der Kartei 'Mesh'

Wählen Sie hier das parabolische viereckige Element mit einer Größe von 5 mm und setzen Sie den Offset-Wert auf Null. Der angegebene Offset-Wert lässt bei Übergängen mit geringem Abstand, die keinen Einfluss auf Festigkeit haben, eine Vernetzung in einer Ebene zu. Als Nächstes rufen Sie die Kartei 'Geometry' auf. Sie erhalten ein weiteres Eingabefenster mit folgendem Aussehen:

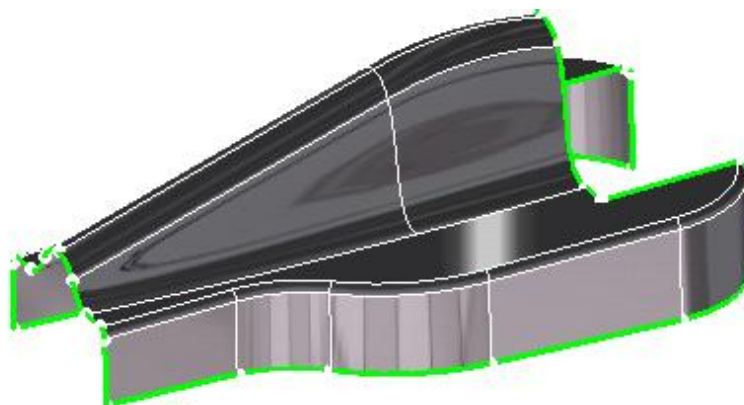
8 Verfügbare Finite Elemente

Eingabeparameter in
der Kartei 'Geometry'



In diesem Fenster können Sie den SAG-Wert mit 0,6 mm festlegen. Der Wert für Bohrungen, die keinen Einfluss auf die Steifigkeit besitzen und damit zu ignorieren sind, setzen Sie bei 'Min holes size' auf 1 mm. Weiters selektieren Sie die Funktion 'Merge during simplification' und geben einen Wert von 0,8 mm ein. Damit erhalten Sie folgendes Ergebnis:

Flächenverbund nach
der Definition der Ver-
netzungsparameter



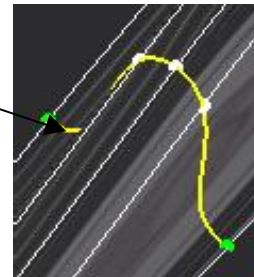
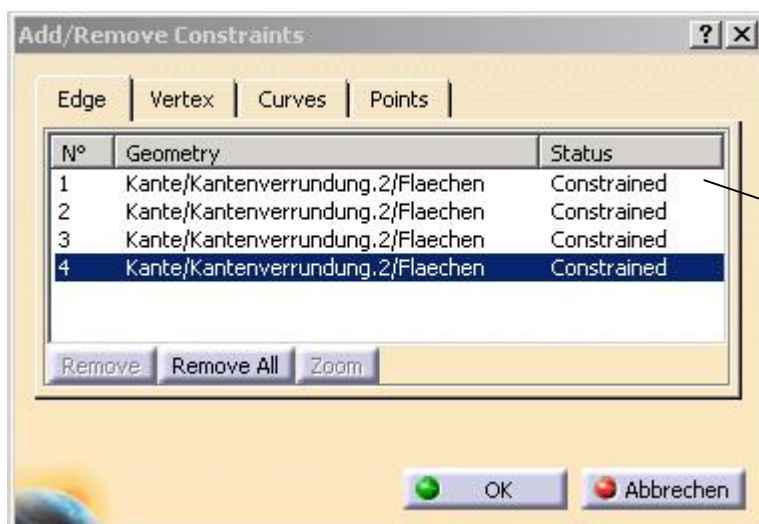
8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)

Rufen Sie anschließend das Icon 'Bedingungen hinzufügen /entfernen' auf:



Bedingungen hinzufügen/entfernen

Im nächsten Eingabefenster ist die Geometrie zu selektieren, für die weitere Bedingungen gesetzt werden sollen.



Selektion der Geometrielemente für weitere Randbedingungen

Wählen Sie die vier Kanten der Lufteinlassöffnung. Für diese Kanten soll die Anzahl der zu verwendenden Knoten manuell festgelegt werden.

Im nächsten Schritt selektieren Sie das Icon 'Erzwungene Elemente':

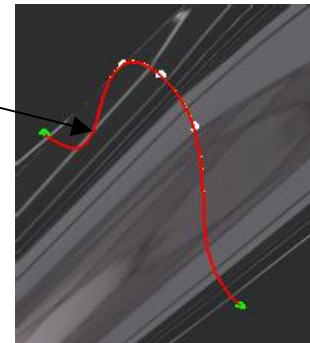
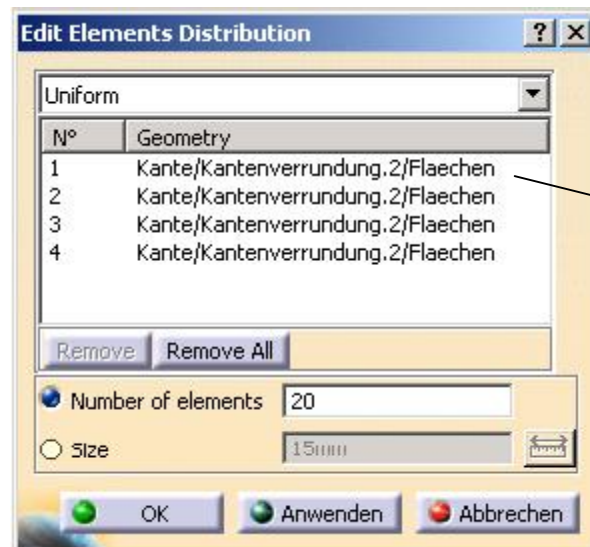


Erzwungene Elemente

Nun sind wieder die zuvor definierten Kanten im Zeichenbereich auszuwählen:

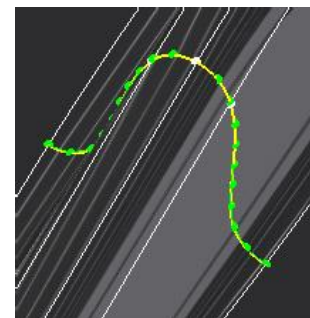
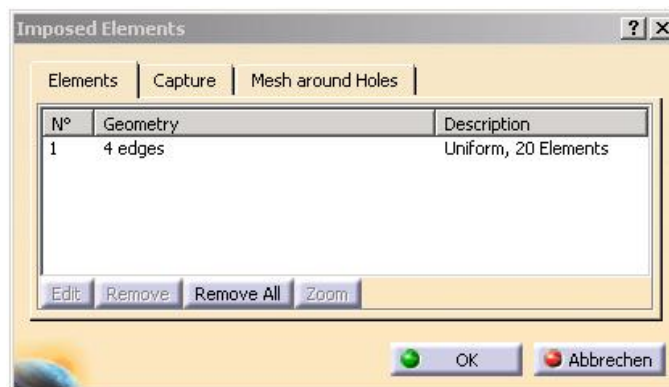
8 Verfügbare Finite Elemente

Definition der Parameter für die manuell erzeugten Elemente



Geben Sie im Eingabefeld 'Number of elements' die Anzahl der Elemente mit 20 ein und wählen Sie die Verteilung 'Uniform'. Damit erhalten Sie folgendes Ergebnis:

Anzeige der gewählten Geometrie sowie Darstellung der erzeugten Elemente



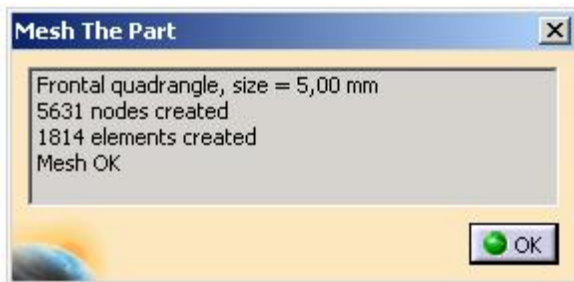
Auf diese Weise kann für bestimmte Geometrieelemente die Anzahl der erzeugten Elemente manuell bestimmt werden. Generell ist die Vernetzung mit viereckigen Schalenelementen ein teilautomatischer Prozess. Nun kann die eigentliche Vernetzung gestartet werden, die jedoch automatisch erfolgt. Selektieren Sie dazu das Icon 'Das Teil vernetzen':

8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)

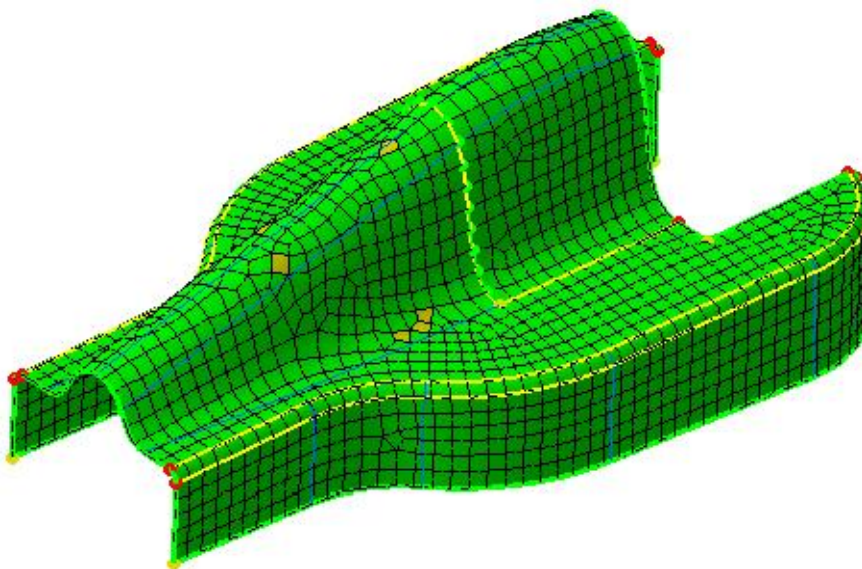


Das Teil vernetzen

Damit erhalten Sie folgendes Netz mit viereckigen parabolischen Schalenelementen:



Generiertes Netz mit
viereckigen parabolischen
Schalenelementen (QD8)



Dieses Ergebnis können Sie mit der Datei '*Chassis_schalen.CATAnalysis*' kontrollieren. Im nächsten Schritt sollte das Netz auf seine Qualität überprüft werden.

8.3.2 Qualität des Netzes überprüfen

Die Überprüfung der Qualität des Netzes erfolgt mit dem Icon 'Qualitätsanalyse':

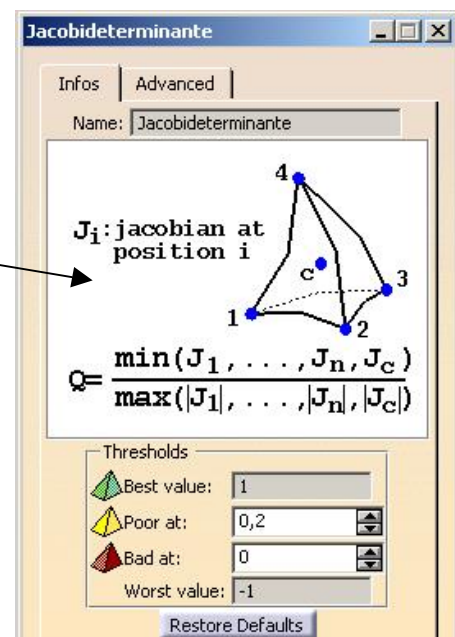
8 Verfügbare Finite Elemente



Qualitätsanalyse

Damit erhalten Sie folgendes Fenster zur Auswertung:

Übersichtsbild der ausgewerteten Qualitätskriterien mit den theoretischen Informationen



Durch Auswahl des Knopfes (...) neben dem entsprechenden Qualitätskriterium erhält man die notwendigen theoretischen Informationen.

Durch Selektion des Icons 'Show Quality Report' erhält man eine Auswertung für alle Elemente des generierten Netzes:



Show Quality Report (Qualitätsbericht)

8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)

Quality Report					
Quality Connectivities					
Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Konus	1806 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,500	0,058
Schräglauf	8 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,278	0,083
Verzerrung	1808 (99,67%)	6 (0,33%)	0 (0,00%)	35,757	6,862
Jacobidetermin...	1814 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,333	0,903
Krümmungsfaktor	1798 (99,56%)	8 (0,44%)	0 (0,00%)	5,495	0,496
Krümmungswinkel	1806 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	23,029	1,544
Schräglaufwinkel	1806 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	60,234	86,553
Dehnung	8 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,675	0,867
Min. Länge	1814 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	2,232	4,719
Max. Länge	1814 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	8,921	5,411
Formfaktor	8 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,785	0,938
Längenverhältnis	1814 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1,962	1,082
-- Global --	1803 (99,39%)	11 (0,61%)	0 (0,00%)		

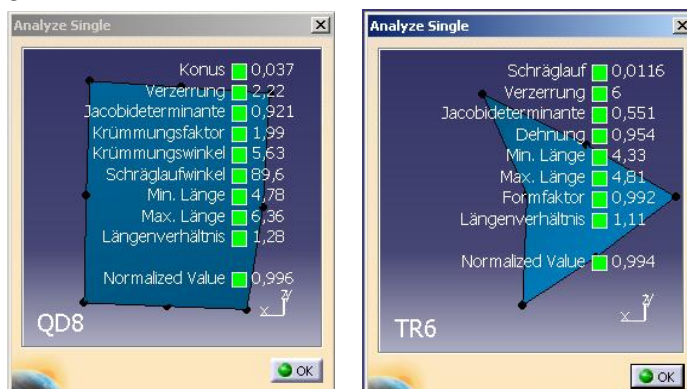
Qualitätsbericht für alle erzeugten Elemente

Die Qualitätsanalyse kann auch für einzelne Elemente des Netzes durchgeführt werden. Verwenden Sie dazu das Icon 'Analyse An Element':



Analyse An Element (Einzelanalyse eines Elements)

Nach der Selektion des gewünschten Elements im Zeichenbereich erhält man folgende Übersicht:



Qualitätsbericht für einzelne selektierte Elemente

Durch Selektion der Kartei 'Connectivities' im Qualitätsbericht erhält man eine komprimierte Übersicht der verwendeten Elemente:

8 Verfügbare Finite Elemente

Übersicht der verwendeten Elemente

Quality Report

Quality

Connectivities

Number of nodes: 5631

Number of element: 1814

Connectivity	Nb of element
QD8	1806 (99,56%)
TR6	8 (0,44%)

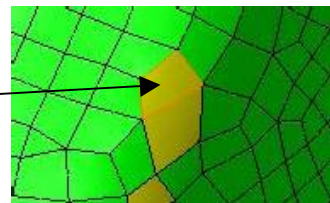
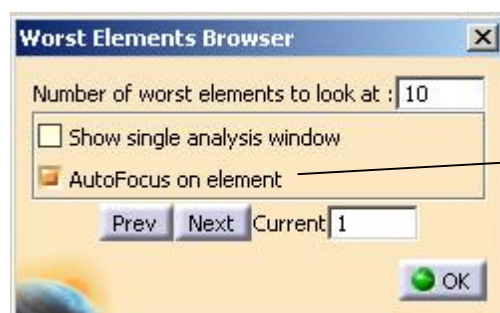
In diesem Fall wurden bei der automatischen Vernetzung QD8- und TR6-Elemente verwendet.

Mit dem Icon 'Worst Elements Browser' erhalten Sie eine Übersicht jener Elemente, die nachbearbeitet werden sollten:



Worst Elements Browser (Anzeige schlechtestes Element)

Browser zur Visualisierung der schlechten Elemente



Mit den Tasten 'Next' und 'Prev' kann zwischen den Elementen weitergeschaltet werden.

8.3.3 Netz editieren

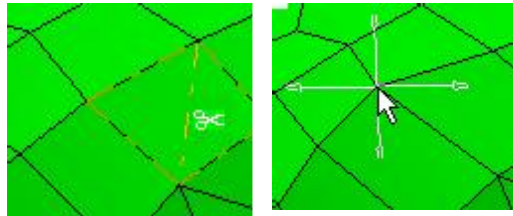
Um schlechte Elemente zu verbessern, kann das erzeugte Netz editiert und manuell nachbearbeitet werden. Dies erfolgt mit dem Icon 'Vernetzung bearbeiten':



Vernetzung bearbeiten

Damit erscheint folgendes Fenster:

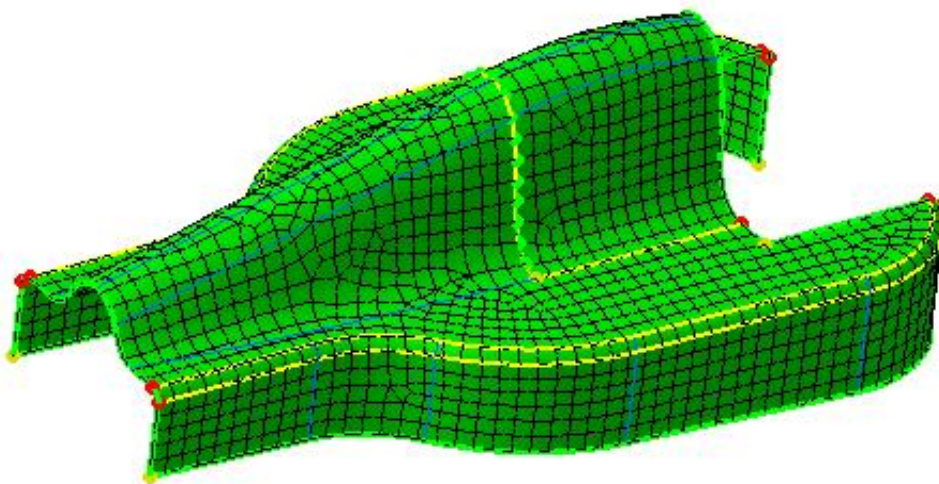
8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)



Möglichkeiten, mit dem Cursor viereckige Elemente zu zerschneiden bzw. Knoten zu verschieben

Selektieren Sie hier die Option 'Smooth around modifications', um auch eine Änderung der benachbarten Elemente zuzulassen und somit die beste Elementqualität zu erreichen. Wird nun der Cursor über ein viereckiges Element bewegt, kann dieses entlang der Diagonale in zwei Dreieckselemente besserer Qualität zerschnitten werden. Weiters ist es möglich, die Knoten mit dem Cursor zu verschieben, um auf diesem Weg ein besseres Ergebnis zu erhalten.

Auf diese Weise erhält man mit wenig Aufwand ein Netz mit lauter qualitativ guten Elementen, was auch eine anschließend durchgeführte Analyse zeigt:



Fertig bearbeitetes Netz nach der Editierung

8 Verfügbare Finite Elemente

Qualitätsbericht nach der
Editierung des Netzes

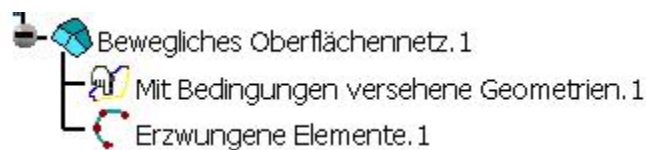
Quality		Connectivities			
Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Konus	1801 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,500	0,062
Schräglauf	18 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,387	0,156
Verzerrung	1819 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	34,997	7,268
Jacobidetermin...	1819 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,333	0,897
Krümmungsfaktor	1801 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	4,996	0,472
Krümmungswinkel	1801 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	20,718	1,452
Schräglaufwinkel	1801 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	61,191	86,473
Dehnung	18 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,597	0,793
Min. Länge	1819 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1,945	4,692
Max. Länge	1819 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	10,390	5,450
Formfaktor	18 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,713	0,889
Längenverhältnis	1819 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	2,115	1,095
-- Global --	1819 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)		

Der angeführte Qualitätsbericht zeigt für alle Kriterien zu 100% gute Elemente. Dieses optimierte Netz erhalten Sie auch mit der Datei 'Cahssis_opt_netz.CATAnylysis'.

8.3.4 Berechnung mit Schalenelementen

Nachdem die Vernetzung fertig ist, können Sie die GPS-Arbeitsumgebung starten. Das Netz mit QD8-Elementen ist im Strukturbaum ersichtlich:

Darstellung des Netzes im
Strukturbaum

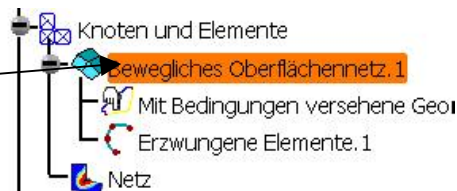


Nun ist es notwendig, dem Chassis eine Wandstärke zuzuordnen. Dies geschieht mit dem Icon 'Eigenschaft des Schalenelements':



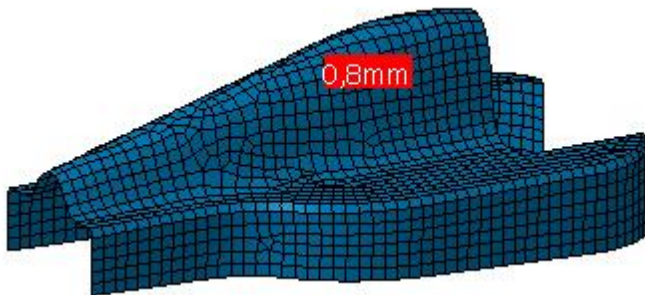
Eigenschaft des Schalenelements

8.3 Viereckige Schalenelemente (2D-Elemente)



Zuordnung einer Wandstärke für den Netzteil

Beim Stützelement wählen Sie am einfachsten das Oberflächennetz im Strukturbaum und geben die entsprechende Wandstärke (0,8mm) im Feld 'Stärke' ein. Damit erhalten Sie folgendes Ergebnis:



Netzdarstellung mit zugewiesener Wandstärke

Definieren Sie nun noch eine quasistatische Lagerung des Bauteils und starten Sie die Berechnung.



Isostatische Bedingung



Berechnung starten

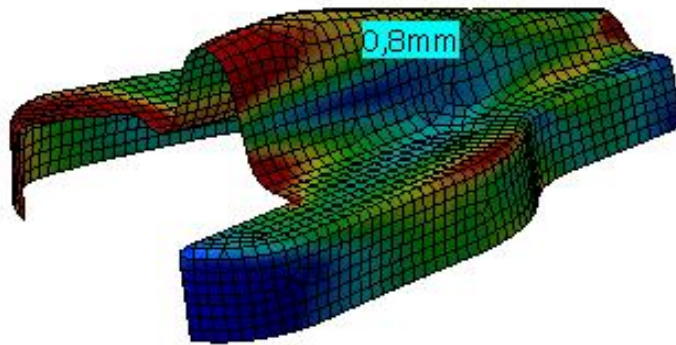


Definition einer isostatischen Randbedingung

8 Verfügbare Finite Elemente

Die Analyse der Berechnungsergebnisse zeigt beispielhaft die 3.Eigenfrequenz bei ca. 75 Hz.

Analyse der Berechnungsergebnisse



Die kompletten Ergebnisse der Frequenzberechnung erhalten Sie mit der Datei 'Chassis_frequenz.CATAnalysis'.

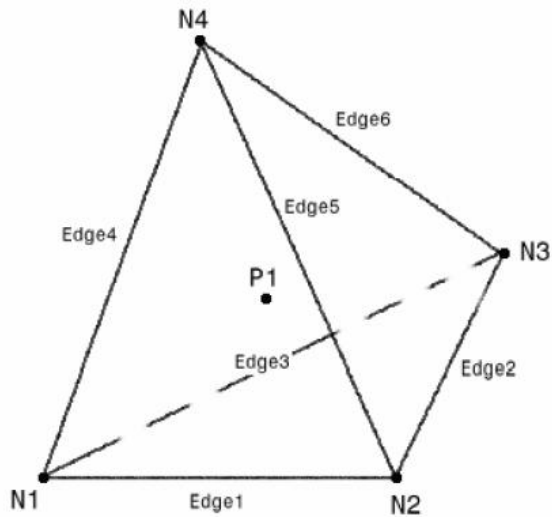
8.4 3D-Elemente (Tetraeder-Elemente)

Die schon häufig verwendeten Tetraeder-Elemente können weiter in lineare sowie parabolische Tetraeder-Elemente unterteilt werden. Die Tetraeder-Elemente eignen sich am besten für eine Berechnung von Volumskörpern, da eine automatische Vernetzung sowie die Nachmodellierung komplexer Geometrien möglich sind.

8.4.1 Lineare Tetraeder-Elemente (TE4)

Prinzipiell besteht das lineare Tetraeder-Element aus vier Knoten mit jeweils nur drei Freiheitsgraden (drei translatorische). Das Verhalten der Tetraeder-Elemente ist elastisch. Schematisch kann ein lineares Tetraeder-Element folgendermaßen skizziert werden:

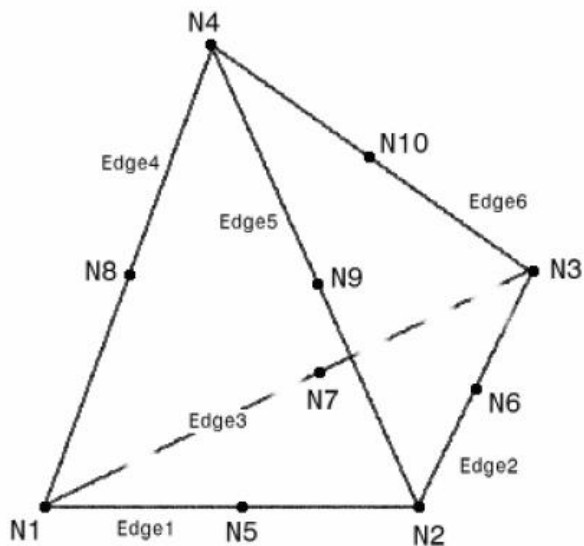
8.4 3D-Elemente (Tetraeder-Elemente)



Prinzipieller Aufbau des linearen Tetraeder-Elements

8.4.2 Das parabolische Tetraeder-Element (TE10)

Dieses Element wird am häufigsten für FEM-Analysen eingesetzt, da es wesentlich genauere Ergebnisse als das lineare Tetraeder-Element liefert. Es besteht aus zehn Knoten mit jeweils drei translatorischen Freiheitsgraden und sieht schematisch folgendermaßen aus:



Prinzipieller Aufbau des parabolischen Tetraeder-Elements

8 Verfügbare Finite Elemente

8.4.3 Unterschiede von TE4- und TE10-Elementen

In diesem Kapitel soll die unterschiedliche Wirkungsweise der linearen und der parabolischen Tetraederelemente hinsichtlich der erzielten Berechnungsergebnisse erklärt werden.

Bei linearen Tetraeder-Elementen ist die Spannung innerhalb eines Elements konstant, das heißt, es herrscht in einem Element nur ein Spannungszustand. Der Spannungszustand kann sich erst im Nachbarelement ändern. Dies führt vor allem bei dünnwandigen Bauteilen zu falschen Ergebnissen. Dort können bei entsprechender Belastung an der Oberseite Zugspannungen bzw. an der Unterseite Druckspannungen anliegen. Die Abbildung dieses Spannungszustands ist nur bei Verwendung von zumindest drei Tetraeder-Elementen über der Wandstärke möglich. Eine quantitative Spannungsaussage bei einer Berechnung mit linearen Tetraeder-Elementen ist jedoch in keinem Fall möglich. Die Verformung innerhalb eines Tetraederelements ist linear. Das heißt, dass die Verformung zwischen zwei Knoten eines Elements als Gerade berechnet wird, wodurch die Struktur zu steif abgebildet wird.

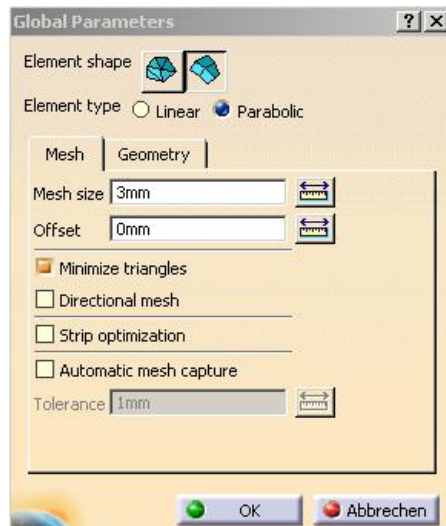
Bei parabolischen Tetraeder-Elementen ist die Spannung innerhalb eines Elements linear. Das bedeutet, dass sich der Spannungszustand zwischen zwei Knoten als Gerade errechnet. Die Verformung bei diesen Tetraeder-Elementen ist parabolisch, was aufgrund der Zwischenknoten möglich ist. Die Verformung zwischen zwei benachbarten Knoten eines Elements wird somit als Parabel berechnet. Bei Berechnung mit parabolischen Tetraeder-Elementen und einem globalen Fehler, der unter 10% liegt, ist somit eine quantitative Spannungsaussage möglich.

8.5 Hexaeder-Elemente (3D-Elemente)

Eine weitere Möglichkeit, dreidimensionale Elemente zu erzeugen, bietet sich wiederum in der Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools'. Durch eine Extrusion von 2D-Schalenelementen können somit 3D-Hexaeder-Elemente (Brick-Elemente) erzeugt werden. Dies soll an einem Beispiel veranschaulicht werden.

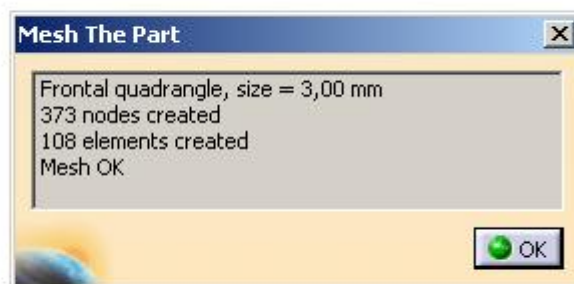
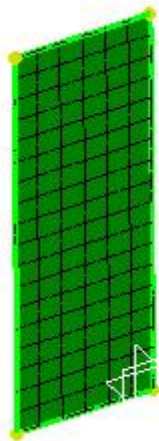
Öffnen Sie dazu die Datei '*Schalen.CATPart*'. Es handelt sich um eine Flächenkonstruktion, der bereits ein Werkstoff zugeordnet ist und die nun mit Schalenelementen vernetzt werden soll. Starten Sie die Arbeitsumgebung 'Advanced Meshing Tools' und rufen Sie das Icon für die Flächenvernetzung auf:

8.5 Hexaeder-Elemente (3D-Elemente)



Eingabe der Elementgröße

Selektieren Sie die dargestellte Fläche und wählen Sie 3 mm als Elementgröße für die viereckigen parabolischen Schalenelemente. Danach wird durch Auswahl des Icons 'Das Teil vernetzen' das Netz erzeugt. Sie erhalten folgendes Ergebnis:



Vernetzung der Fläche mit QD8-Elementen

Das Ergebnis ist in der Datei '2D_QD8.CATAnalysis' dokumentiert. Im nächsten Schritt soll eine Extrusion dieses Schalennetzes durchgeführt werden. Dazu ist es in

8 Verfügbare Finite Elemente

jedem Fall notwendig, die Datei vorher zu speichern und erneut zu öffnen, um die entsprechende Symbolleiste für die Extrusion zu erhalten.

Die Symbolleiste für die Extrusion hat folgendes Aussehen:



Symbolleiste für Extrusion von Netzen

Es gibt drei Möglichkeiten für die Extrusion:

- Verschiebung
- Drehung
- Symmetrie

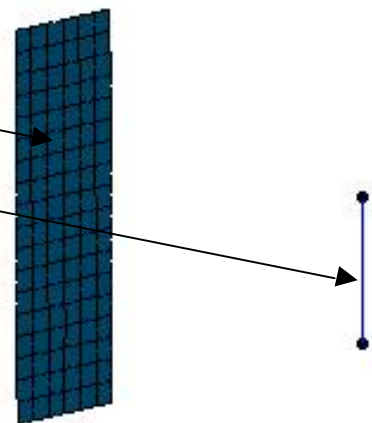
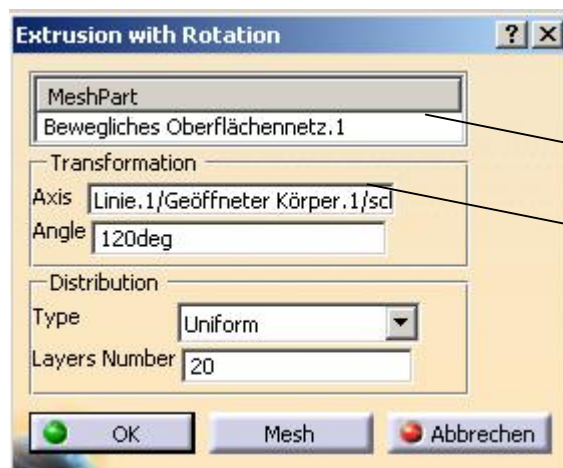
In diesem Beispiel verwenden Sie die Extrusion mit Drehung:



Extrusionsvernetzung mit Drehung

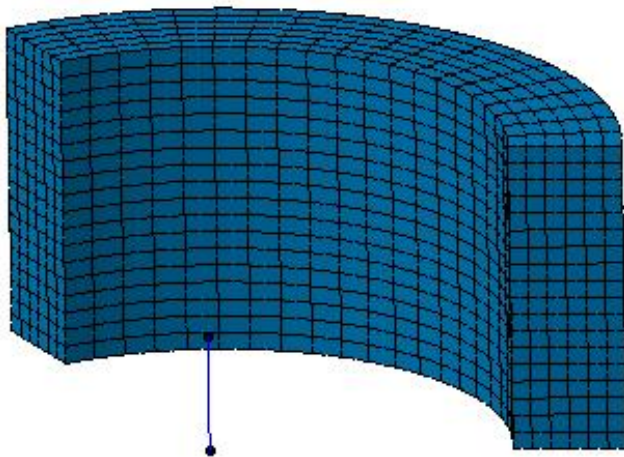
Nach dem Aufruf des dargestellten Icons erhalten Sie folgendes Eingabefenster:

Parameter für die Extrusion mit Drehung



8.5 Hexaeder-Elemente (3D-Elemente)

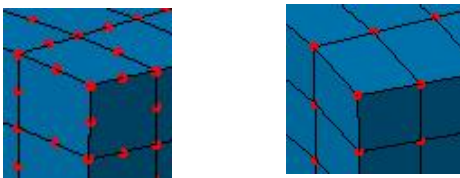
Im Eingabefeld für 'MeshPart' selektieren Sie das soeben erzeugte Schalennetz, und als Achse wird die vorhandene Linie ausgewählt. Der Winkel der Rotation beträgt in diesem Fall 120° , die Anzahl der Layer ist mit 20 einzugeben. Damit erhält man nach Selektion der Taste 'Mesh' folgendes 3D-Netz:



Generiertes dreidimensionales Netz mit Hexaeder-Elementen (QD8)

Das erzeugte Netz besteht aus dreidimensionalen Elementen, und zwar dem parabolischen Hexaeder-Element HE20, und kann mit der Datei '*3D_hexaeder HE20.CATAnalysis*' verglichen werden.

Das HE20-Element besteht aus 20 Knoten und das ebenfalls verfügbare lineare Hexaeder-Element HE8 aus 8 Knoten.



Hexaeder-Elemente HE20 und HE8

Durch Aufruf der GPS-Arbeitsumgebung kann eine entsprechende FEM-Analyse mit diesem soeben erzeugten Hexaedernetz durchgeführt werden.

Diese Hexaeder-Elemente (Brickelemente) führen zu sehr realitätsgetreuen Ergebnissen, speziell wenn mit einem parabolischen Element mit 20 Knoten vernetzt wurde. Der Nachteil der Brickelemente liegt darin, dass eine automatische Vernetzung der

8 Verfügbare Finite Elemente

Bauteile nicht möglich ist. Somit muss das Netz großteils auf manuelle Weise erzeugt werden, was auch bei Geometrieänderungen einen erheblichen Aufwand bedeutet.

9 Übungsbeispiele GPS

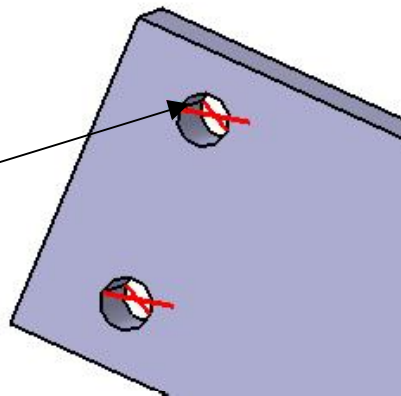
In diesem Kapitel finden Sie genau beschriebene Beispiele, die das Verständnis der zuvor beschriebenen Inhalte festigen sollen.

9.1 Stahlplatte mit Bolzenverbindung

Eine Stahlplatte, die zur Aufnahme eines Formrohrs dient, wird über zwei Bolzen an einem vertikalen Träger befestigt. Die beiden Bolzen vom Durchmesser 8mm sollen über virtuelle Elemente nachgebildet werden. Die Stahlplatte wird an der vorderen etwas ausragenden Fläche in schräger Richtung mit einer Kraft von 1500N belastet.

Beginnen Sie die Übung mit dem Öffnen der Datei '*Stahlplatte_bolzenverb.CATPart*'. Dem Konstruktionsteil ist bereits das Material Stahl zugewiesen, somit steht einem Starten der Arbeitsumgebung GPS nichts mehr im Wege.

Definieren Sie in den beiden Bohrungen zur Bolzenaufnahme jeweils ein starres virtuelles Element.

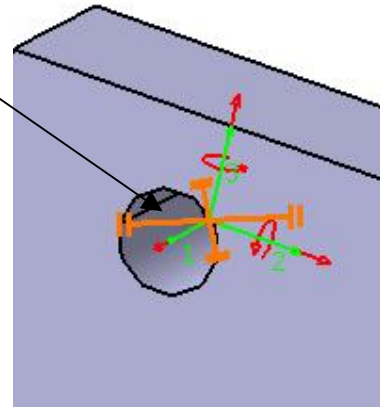
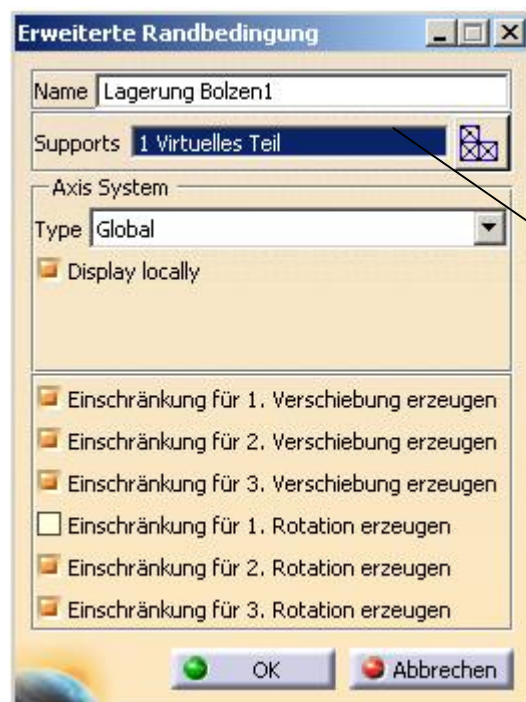


Definition von zwei starren virtuellen Elementen in den Bolzenbohrungen

Die Randbedingung für diese Bolzenverbindung definieren Sie unter Verwendung der erweiterten Bedingung. Dabei wird die 1.Rotation, nämlich um die Bolzenachse, freigegeben. Die genaue Vorgangsweise ist den folgenden Bildern zu entnehmen:

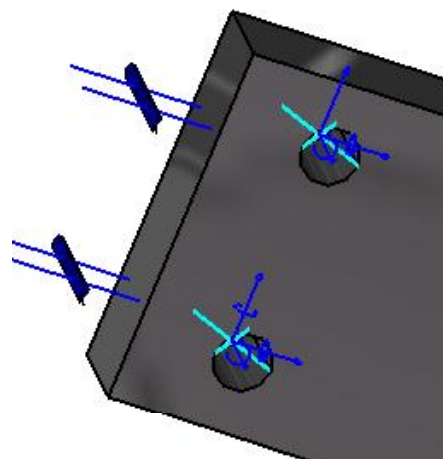
9 Übungsbeispiele GPS

Anwendung der erweiterten Bedingung auf das starre virtuelle Element in der Bolzenbohrung



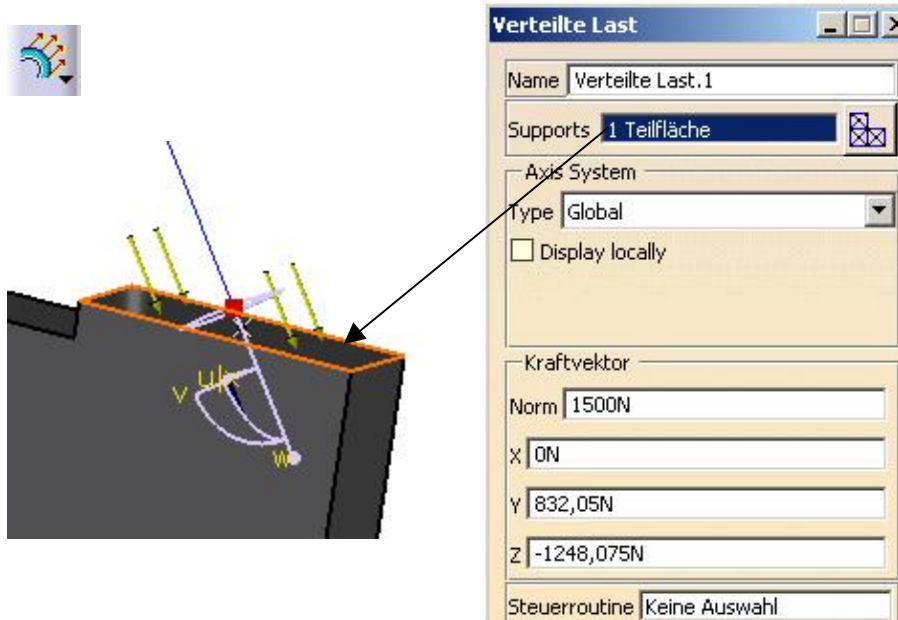
Weiters ist die Eingabe einer zusätzlichen Randbedingung notwendig. Die hintere Fläche der Platte kann sich an der Stahlkonstruktion abstützen, was mit einem ebenen Flächenloslager abgebildet wird.

Definition des ebenen Flächenloslagers



9.1 Stahlplatte mit Bolzenverbindung

Damit ist der Bauteil ausreichend gelagert, und Sie können nun die Kraft auf die vordere Fläche aufbringen. Diese Kraft wirkt in Richtung der dort konstruierten Linie. Verwenden Sie dazu das Icon 'Verteilte Last'.



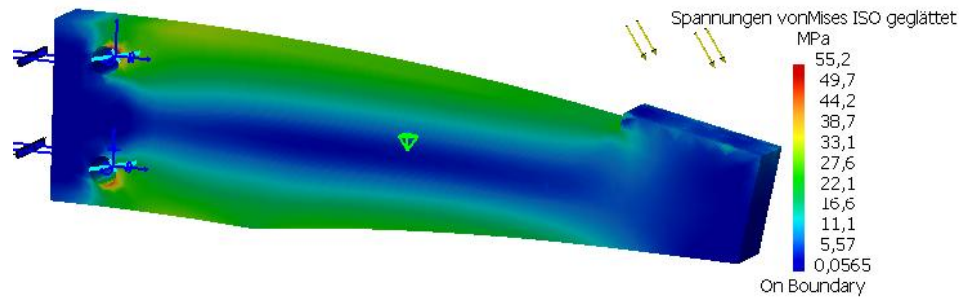
Definition der verteilten Last entlang einer vorgegebenen Richtung

Um die Kraft entsprechend auszurichten, positionieren Sie den am rechten oberen Bildschirmrand befindlichen Kompass genau über der blauen Linie, um so die Ausrichtung der Kraft zu definieren. Im Eingabefeld 'Norm' geben Sie für die Resultierende der Kraft 1500N ein, die Aufteilung auf die einzelnen Richtungen erfolgt automatisch.

Nachdem Sie all diese Tätigkeiten korrekt durchgeführt haben, können Sie die Berechnung starten. Zur Überprüfung steht die Datei '*Bolzenverbindung_starr.CATAnalysis*' zur Verfügung. Kontrollieren Sie nach durchgeführter Berechnung mit linearen Tetraeder-Elementen das erhaltene Ergebnis bezüglich der qualitativen Spannungsverteilung. Danach ist es sinnvoll, eine Netzverfeinerung durchzuführen. Wählen Sie nunmehr das parabolische Tetraeder-Element TE10 mit einer Größe von 5mm und einem absoluten Durchhang (SAG-Wert) von 0,5mm. Die Berechnungsergebnisse sind im unteren Bild zu sehen.

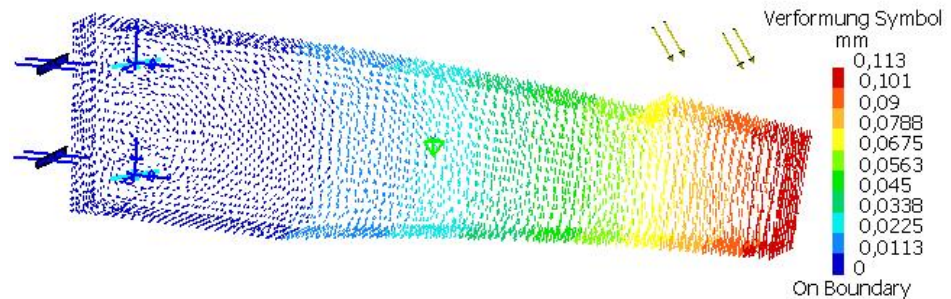
9 Übungsbeispiele GPS

Spannungsverlauf in der Stahlplatte bei Analyse mit TE10-Elementen



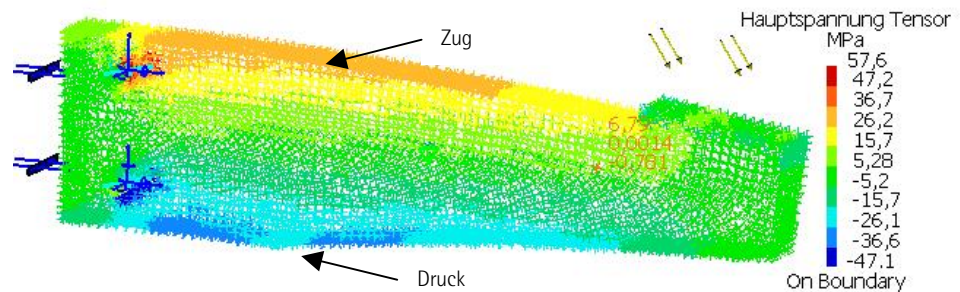
Der Spannungsverlauf zeigt sehr schön die Zugspannungen im oberen Bereich der Stahlplatte sowie die Druckspannungen im unteren Bereich. Die Spannungen im Bereich der Bolzenbohrung sind jedoch aufgrund der auftretenden Versteifung durch die Verwendung von starren virtuellen Elementen nicht der Realität entsprechend. Bei einer Animation der Bewegung sieht man, dass die virtuellen Elemente nur die kinematischen Randbedingungen korrekt abbilden.

Auftretende Verformungen der Stahlplatte



Die maximale Verformung liegt im Bereich von 0,1mm im vorderen Teil der Platte.

Analyse der Hauptspannungen; Zugspannungen haben positives, Druckspannungen negatives Vorzeichen

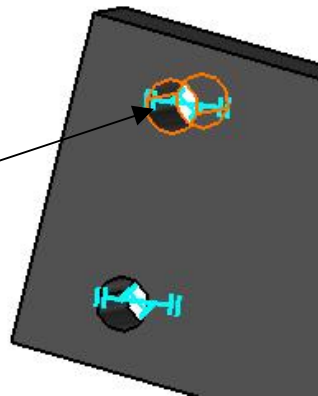


9.1 Stahlplatte mit Bolzenverbindung

Bei einer Analyse der Hauptspannungen mit verwendetem Filter C1 (vorherrschende Zugspannungen) sieht man, dass die Zugspannungen an der Plattenoberseite ungefähr 50N/mm^2 erreichen, die Druckspannungen an der Unterseite 47N/mm^2 .

In einem zweiten Rechenschritt werden nun die starren virtuellen Elemente durch virtuelle Kontaktelemente ersetzt. Damit können auch die Verformung der Bolzenbohrung (Lochleibung) und die dort auftretenden Spannungen (Hertzsche Pressung) berechnet werden.

Die Definition der virtuellen Kontaktelemente erfolgt wie in den unteren Bildern gezeigt:



Definition der virtuellen Kontaktelemente

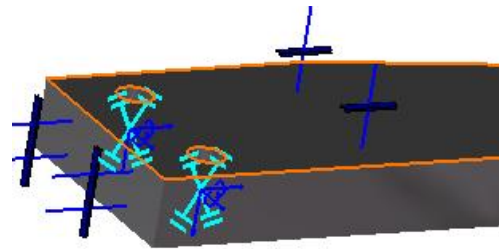
Wiederum ist mit einer erweiterten Bedingung die entsprechende Randbedingung für die virtuellen Elemente zu definieren. Es wird dabei die Rotation um die Bohrungsachse freigegeben. Die notwendige Vorgangsweise entspricht jener der ersten Übung.

Die Abstützung der Platte an der Unterkonstruktion ist mit einem Flächenloslager an der hinteren Fläche zu bewerkstelligen.

Um nun die virtuellen Kontaktelemente an einer Verschiebung in Richtung der Bohrungsachse zu hindern, ist es erforderlich, die Stahlplatte an einer seitlichen Fläche mit einer weiteren Randbedingung zu versehen. Auch dies geschieht mit einem Flächenloslager. Dazu gehen Sie wie folgt vor:

9 Übungsbeispiele GPS

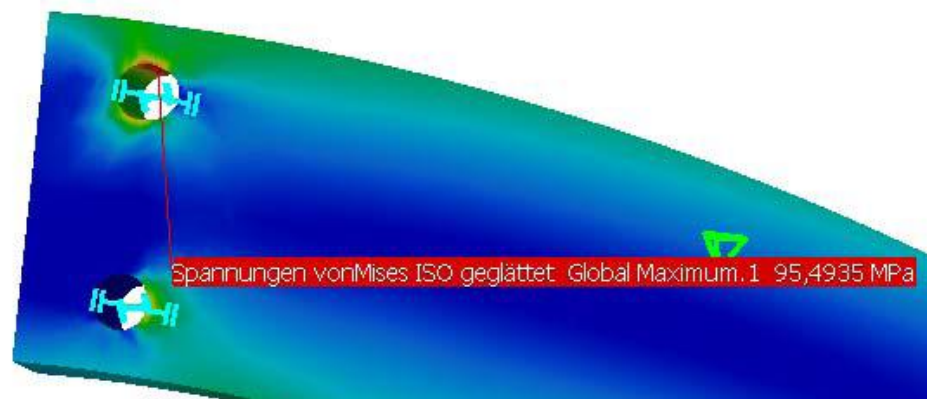
Definition eines weiteren Flächenloslagers



Als Support selektieren Sie die markierte seitliche Fläche, womit eine Bewegung normal dazu nicht mehr möglich ist.

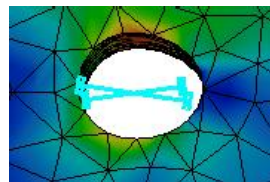
Die Last von 1500N wird analog zum 1.Fall aufgebracht. Das Ergebnis all dieser Randbedingungen können Sie mit der Datei '*Bolzenverbindung_virtuell_Kontakt.CATAnalysis*' vergleichen. Nach einer ersten Berechnung und anschließender Netzverfeinerung auf das parabolische Element TE10 mit den oben angeführten Werten erhalten Sie folgendes Analyseergebnis:

Spannungsverteilung bei Berechnung mit TE10-Elementen



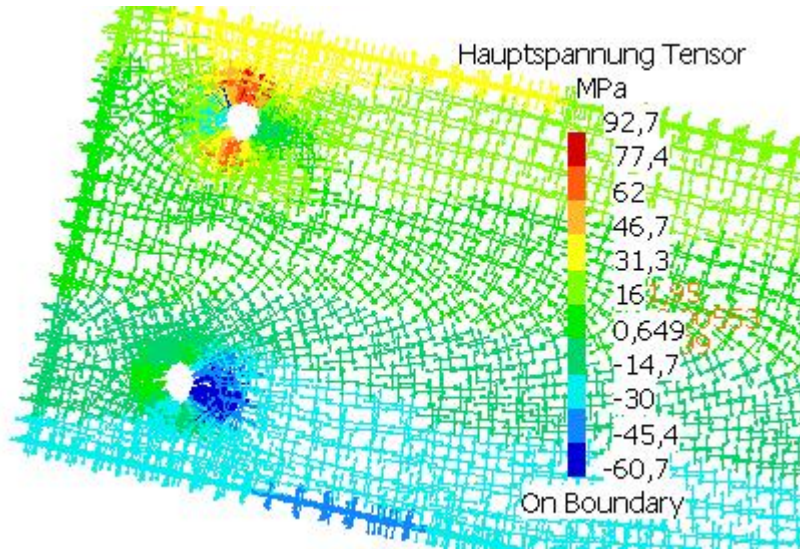
Die größten auftretenden Spannungen von 95 N/mm^2 finden sich nun im Bereich der Bolzenbohrung und werden durch die Hertzsche Pressung verursacht. Es ist auch eindeutig die Verformung (Lochleibung) der Bohrung zu erkennen, was aufgrund der möglichen Kraftübertragung beim virtuellen Kontaktteil der Fall ist.

Lochleibung und Hertzsche Pressung



9.2 Kipphebel

Schließlich stellt man bei Betrachtung der Hauptnormalspannungen fest, dass die untere Bohrung aufgrund der Verformung hauptsächlich druckbeansprucht ist.



Hauptspannungen im
Bereich der Bolzenboh-
rungen

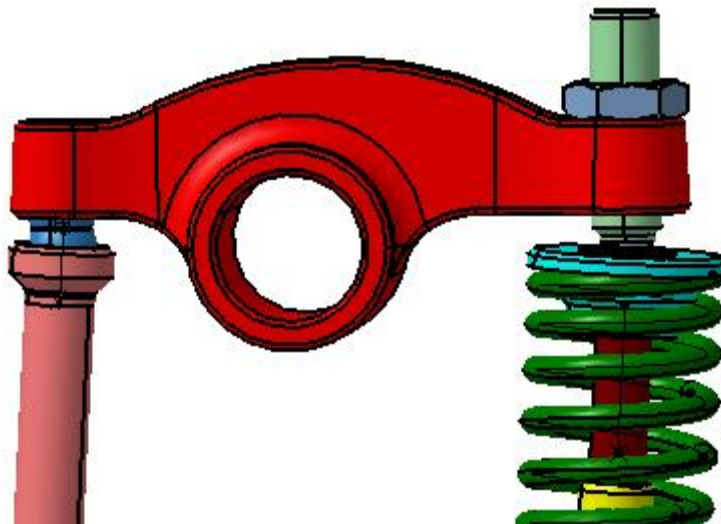
In diesem Übungsbeispiel kann sehr schön die unterschiedliche Wirkungsweise des starren virtuellen Elements mit dem virtuellen Kontaktteil verglichen werden. Man sieht, dass mit dem virtuellen Kontaktteil eine gute Abbildung der realen Verhältnisse möglich ist. Falls die Analyse der Spannungen im Bereich der Bolzenbohrungen nicht von Interesse ist, findet man auch mit dem starren virtuellen Element das Auslangen. Der Spannungsverlauf an der Plattenoberseite (Zug) sowie an der Plattenunterseite (Druck) ist nämlich nahezu identisch.

9.2 Kipphebel

In diesem Übungsbeispiel wird eine FEM-Analyse eines Kipphebels durchgeführt. Es handelt sich um eine Anordnung mit untenliegender Nockenwelle, bei welcher der Kipphebel über Stößel und Stößelstange bewegt wird. Die prinzipielle Anordnung ist der unteren Abbildung zu entnehmen:

9 Übungsbeispiele GPS

Ventiltrieb bei unten
liegender Nockenwelle

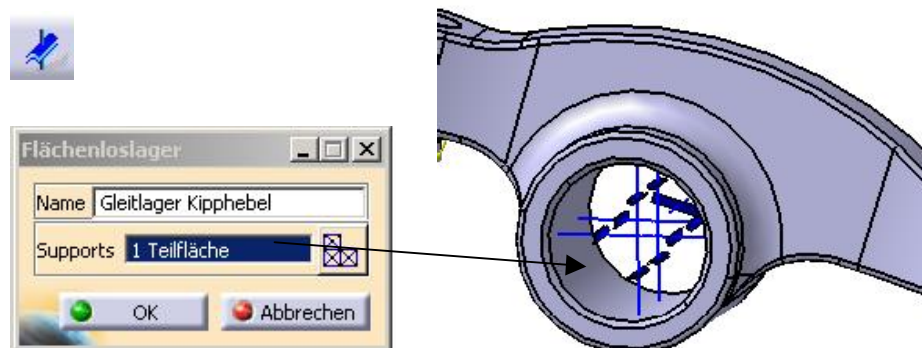


Der Kipphebel ist im Zylinderkopf gleitgelagert und überträgt die Bewegung über den verstellbaren Kipphebeleinsatz und ein Kugelgelenk auf das Ventil. Die von der Stößelstange auf den Kipphebel übertragene Kraft setzt sich zusammen aus der auf die Stößelseite reduzierten Federkraft und der reduzierten Masse mal der auftretenden Beschleunigung. Dies ergibt eine resultierende Kraft von ungefähr 760N.

Um mit der FEM-Analyse beginnen zu können, öffnen Sie das Startmodell 'Kipphebel.CATPart'. Der entsprechende Gusswerkstoff ist bereits zugewiesen, womit Sie mit der Definition der Randbedingungen starten können.

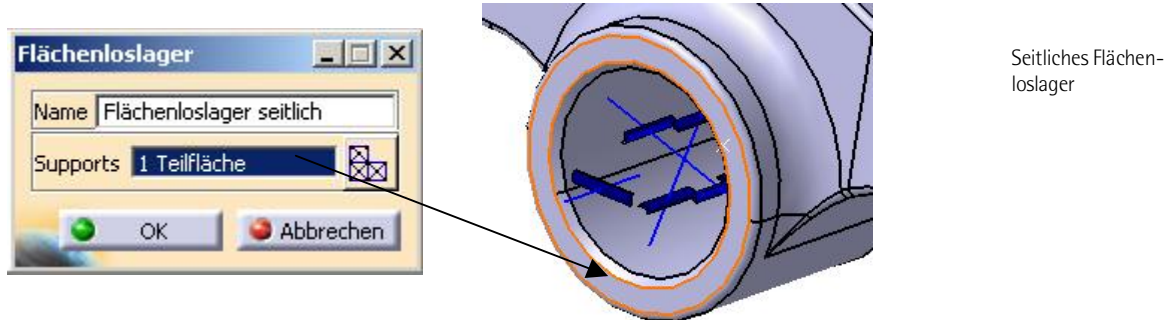
Zuerst ist die Gleitlagerung des Kipphebels im Zylinderkopf zu definieren.

Gleitlagerung des Kipp-
hebels

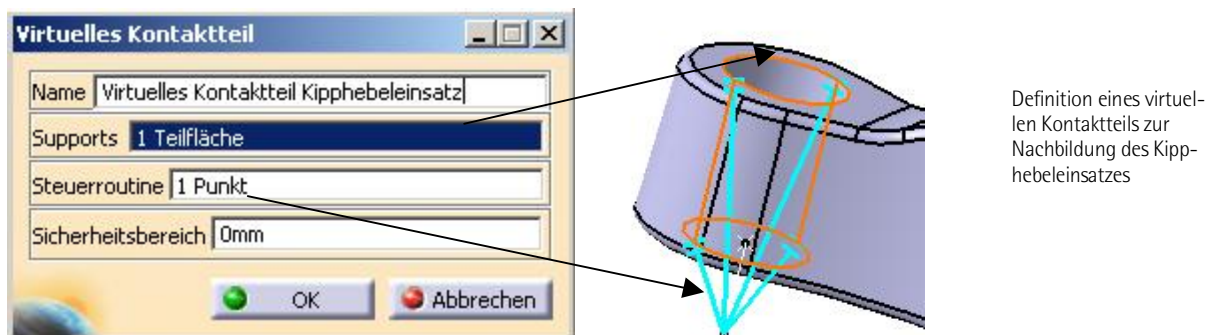


9.2 Kipphebel

Um darüber hinaus ein Verschieben des Kipphebels in axialer Richtung zu vermeiden, ist ein weiteres Flächenloslager für die seitliche Auflagefläche zu definieren.



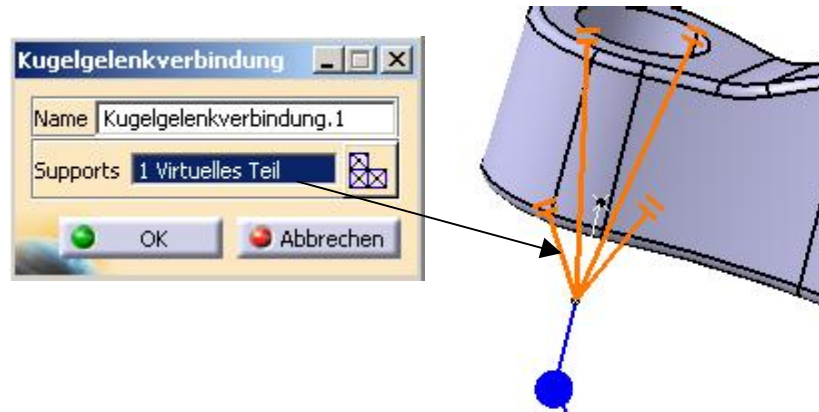
Um den Kipphebeleinsatz sowie die Einstellmutter abbilden zu können, definieren Sie ein virtuelles Kontaktteil, das nicht nur die kinematischen Bedingungen, sondern auch die Übertragung von Kräften ermöglicht.



Als Support selektieren Sie die Bohrungsmantelfläche, und als Steueroutine ist der konstruierte Mittelpunkt des Kugelgelenks zu wählen. Da die Bewegung über eine Kugelgelenksverbindung auf das Ventil übertragen wird, ist dazu eine entsprechende Randbedingung zu vergeben. Mit dieser Randbedingung sind alle drei Freiheitsgrade der Translation gesperrt und alle drei Freiheitsgrade der Rotation frei.

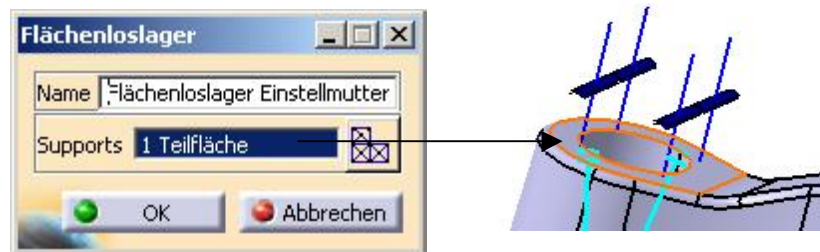
9 Übungsbeispiele GPS

Randbedingung für das virtuelle Kontaktteil



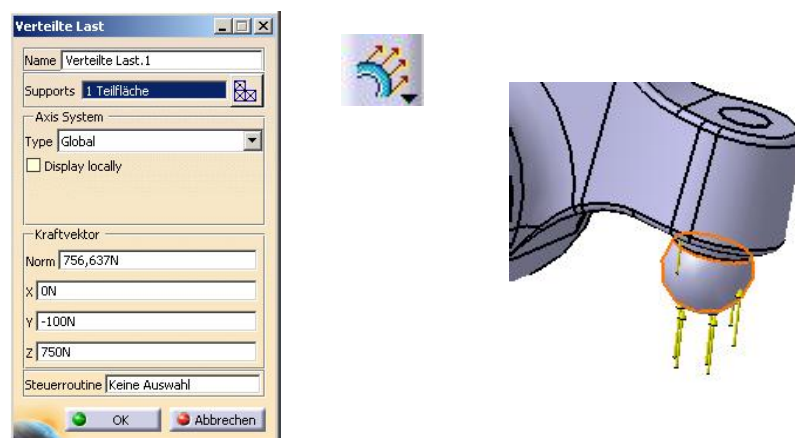
Zum Schluss vergeben Sie ein weiteres Flächenloslager an der Oberseite des Kipphebels, an der Stelle, wo sich die Einstellmutter befindet.

Flächenloslager für die Auflagefläche der Einstellmutter



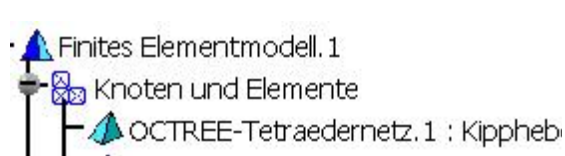
Nun muss noch die Kraft, die von der Stößelstange auf den Kipphebel wirkt, angesetzt werden. Sie setzt sich aus 750N in Z-Richtung und 100N in Y-Richtung zusammen.

Definition der Belastung des Kipphebels



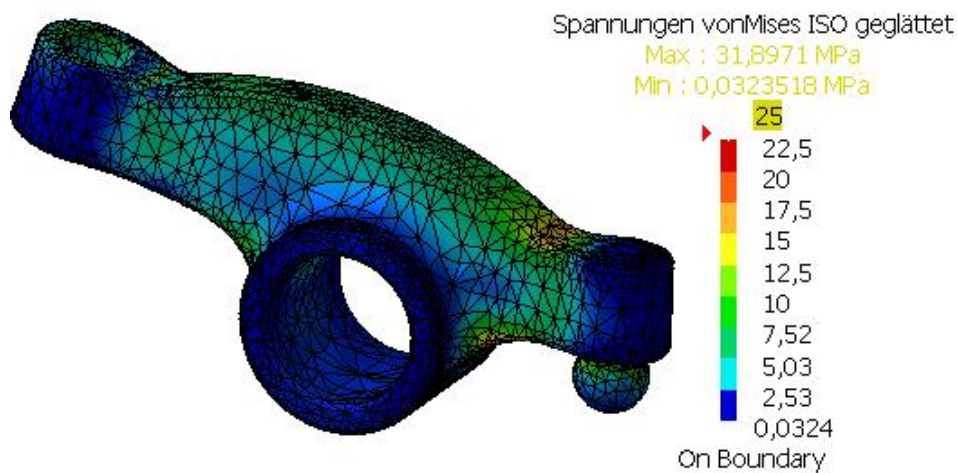
9.2 Kipphebel

Sobald all diese Randbedingungen vergeben sind, können Sie eine erste Berechnung mit linearen Tetraeder-Elementen starten. Nach einer Verfeinerung des Netzes mit TE10-Elementen mit einer Größe von 7,2mm und einem SAG-Wert von 1,1mm können Sie eine quantitative Spannungsaussage treffen.



Netzverfeinerung mit parabolischen Elementen

Die Analyse der Berechnungsergebnisse führt zu folgenden Werten:

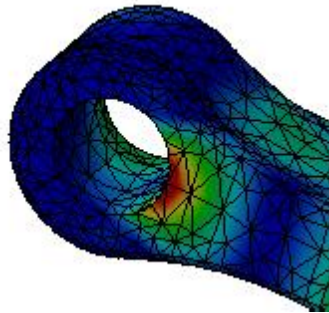


Spannungsverteilung des Kipphebels (VonMises-Vergleichsspannungen)

Die maximalen Spannungen liegen im Bereich von ungefähr 30N sowohl an der Unterseite des Kipphebels (Zugspannungen) als auch an der Oberseite (Druckspannungen). Wiederum ist auch die hohe Druckspannung im Bereich des virtuellen Kontaktteils zu erkennen (Hertzsche Pressung).

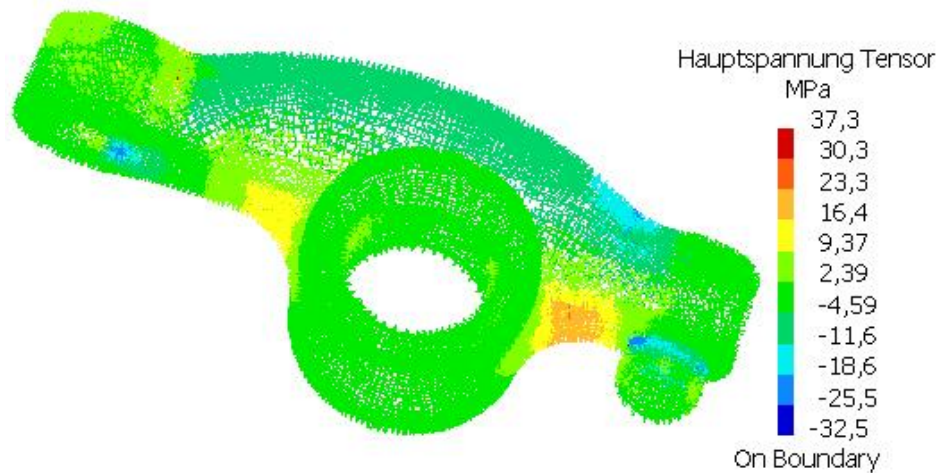
9 Übungsbeispiele GPS

Druckspannungen beim
virtuellen Kontaktteil



Die Analyse der Hauptnormalspannungen ergibt folgenden Verlauf:

Analyse der Hauptnor-
malspannungen



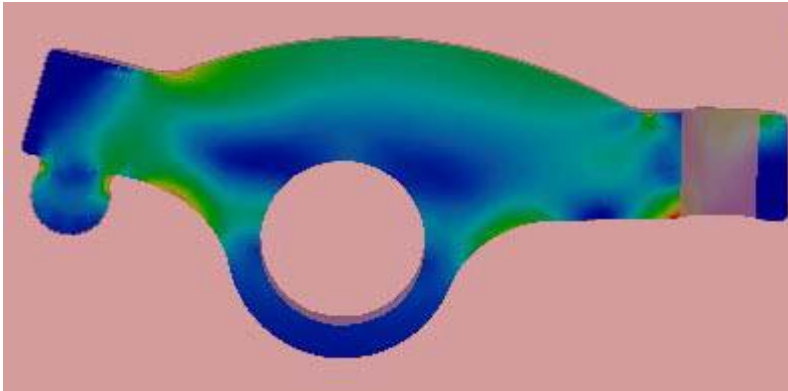
Eindeutig sind hier die Zug- und Druckbereiche zu erkennen. Die Darstellung der Hauptnormalspannungen wurde mit dem Filter C1 erzeugt.

Abschließend ist in diesem Beispiel noch der Spannungsverlauf innerhalb des Kipphebels dargestellt. Sie erhalten diese Auswertung über das Icon 'Schnittebenenanalyse'. Man erkennt sehr schön den neutralen (spannungsfreien) Bereich innerhalb des Bauteils, und wie die Spannungen sich nach innen abbauen.

Schnittebenen-
analyse



9.3 Sicherungsring



Charakteristischer Spannungsverlauf innerhalb des Bauteils

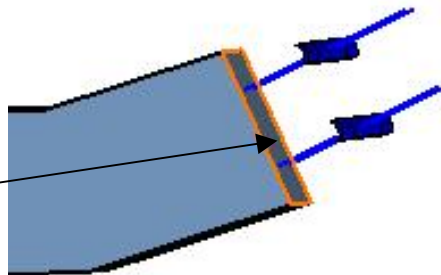
9.3 Sicherungsring

Hauptziel dieses Beispiels ist die Berücksichtigung der Bauteilsymmetrie und die Erläuterung der dabei notwendigen Vorgangsweise.

Ein genormter Sicherungsring 40x1,6mm wird bei der Montage auf der Welle um 2mm aufgespannt, um an der gewünschten Stelle montiert zu werden. Dies ist über eine erzwungene Verschiebung zu definieren.

Beginnen Sie das Beispiel mit dem Öffnen der Datei *'Sicherungsring 40x1,6_fem.CATPart'*. Nach der Zuordnung eines entsprechenden Materials (in diesem Fall ein Federstahl), starten Sie die Arbeitsumgebung GPS und rufen eine statische Analyse auf.

Beginnen Sie damit, die Symmetrierandbedingung zu definieren.



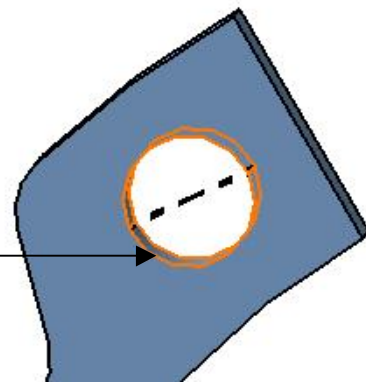
Definition der Symmetrierandbedingung

9 Übungsbeispiele GPS

Dabei ist beim Eingabefeld für Supports die in der Symmetrieebene liegende Fläche des Sicherungsrings zu wählen.

Anschließend definieren Sie in der Bohrung des Sicherungsrings ein virtuelles Element. Hier wird ein bewegliches virtuelles Element benötigt, um einerseits die kinematische Randbedingung als auch die mögliche Verformung des Sicherungsrings möglichst realitätsgetreu wiederzugeben. Gehen Sie dazu folgendermaßen vor:

Definition eines beweglichen virtuellen Teils



Als Supportfläche wählen Sie die Mantelfläche der Bohrung, die Steueroutine wird automatisch bestimmt.

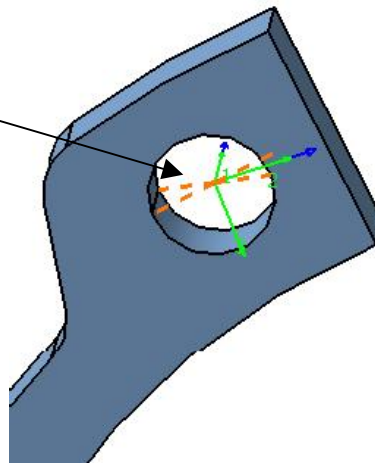
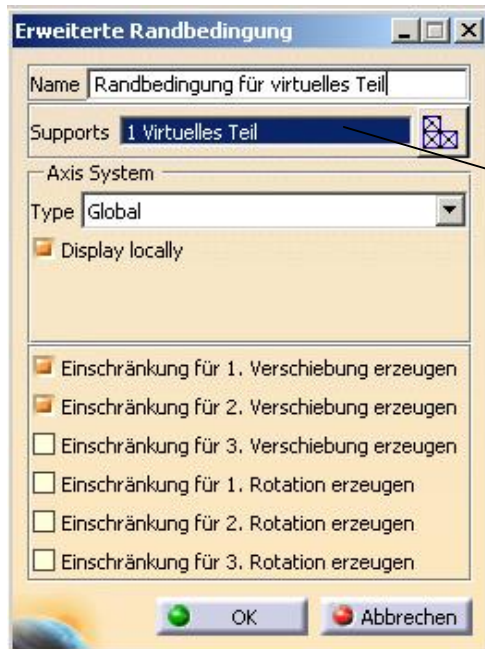
Als Nächstes ist für dieses bewegliche virtuelle Element die statische Lagerungsbedingung zu definieren. Verwenden Sie dazu die erweiterte Bedingung und sperren Sie im globalen Koordinatensystem die Verschiebungen in Richtung 1 und 2. Die notwendige Vorgangsweise ist den nachfolgenden Bildern zu entnehmen:

Erweiterte Bedingung



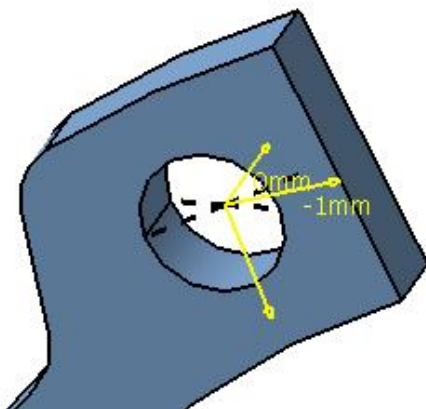
Rufen Sie zuerst das Icon 'Erweiterte Bedingung' auf. Im anschließenden Eingabefenster treffen Sie folgende Auswahl:

9.3 Sicherungsring



Definition der Randbedingung für das virtuelle Teil

Nun ist noch die erzwungene Verschiebung des Sicherungsrings um einen Millimeter (aufgrund der Symmetrie ist der Wert von 2mm zu halbieren) zu definieren. Gehen Sie dabei wie folgt vor:



Aufbringen einer erzwungenen Verschiebung

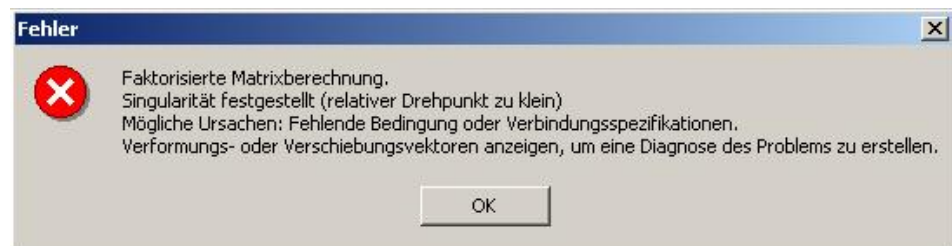
9 Übungsbeispiele GPS

Im Feld 'Einschränkung' ist die zuvor definierte erweiterte Bedingung zu selektieren.
Im Feld für die 2. Verschiebung geben Sie als Wert 1mm ein.

Starten Sie nun die Berechnung mit dem schon bekannten Icon:



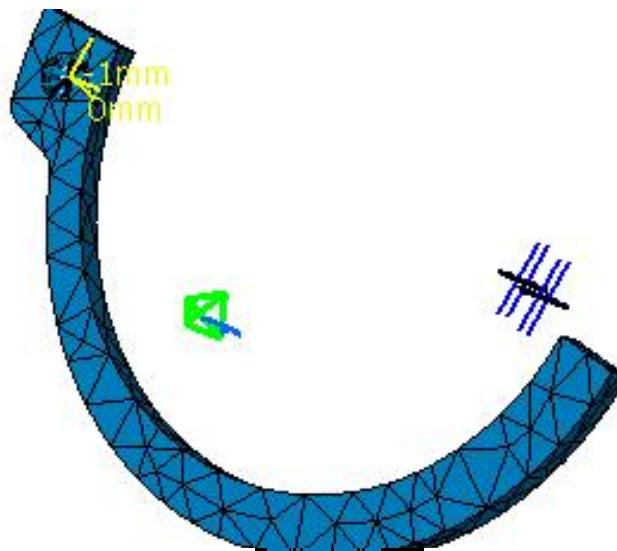
Es erscheint daraufhin folgende schon im Kapitel 3 beschriebene Fehlermeldung bei statisch unbestimmter Lagerung:



Rufen Sie zur Analyse des noch vorhandenen Freiheitsgrades die Netzdarstellung des Bauteils auf:

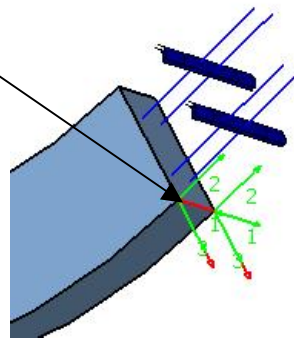
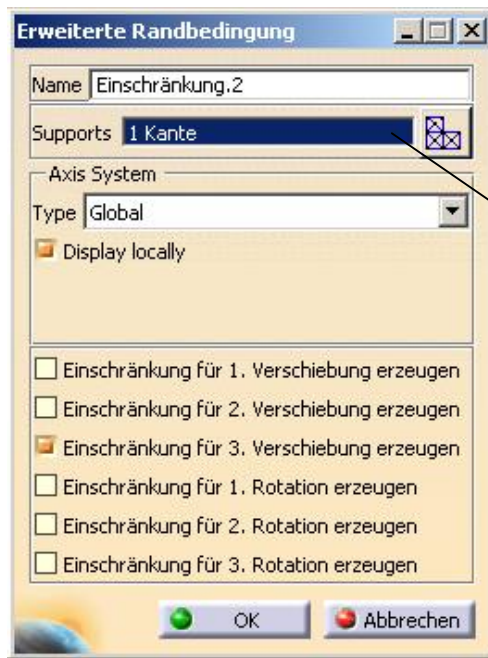


Analyse des verbliebenen
Freiheitsgrades



9.3 Sicherungsring

Damit ist eine Animation der verbliebenen Bewegungsmöglichkeit des Bauteils durchführbar. Mit der Definition einer zusätzlichen erweiterten Bedingung ist dieser Freiheitsgrad zu eliminieren.



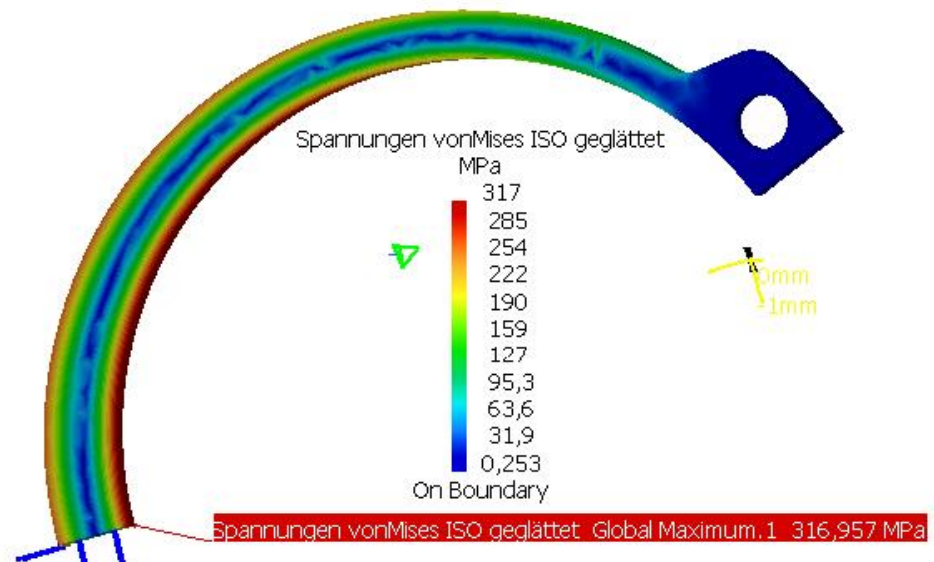
Eliminierung des noch vorhandenen Freiheitsgrades mit Hilfe einer erweiterten Bedingung

Selektieren Sie als Support die untere Kante der Symmetrieffläche und erzeugen Sie eine Einschränkung für die 3. Verschiebung. Damit ist der Bauteil nun statisch bestimmt gelagert und eine Berechnung wird durchgeführt.

Verfeinern Sie anschließend noch das Netz auf TE10-Elemente mit einer Größe von 1,5mm und einem SAG-Wert von 0,15mm. Nach erneuter Berechnung erhalten Sie nun ein Ergebnis, mit dem auch eine quantitative Spannungsaussage möglich ist. Die Ergebnisse erhalten Sie auch mit der Datei '*Sicherungsring_fem_symmetrie.CATAnalysis*'. Im nächsten Bild sehen Sie die ausgewiesenen VonMises-Vergleichsspannungen des Sicherungsringes:

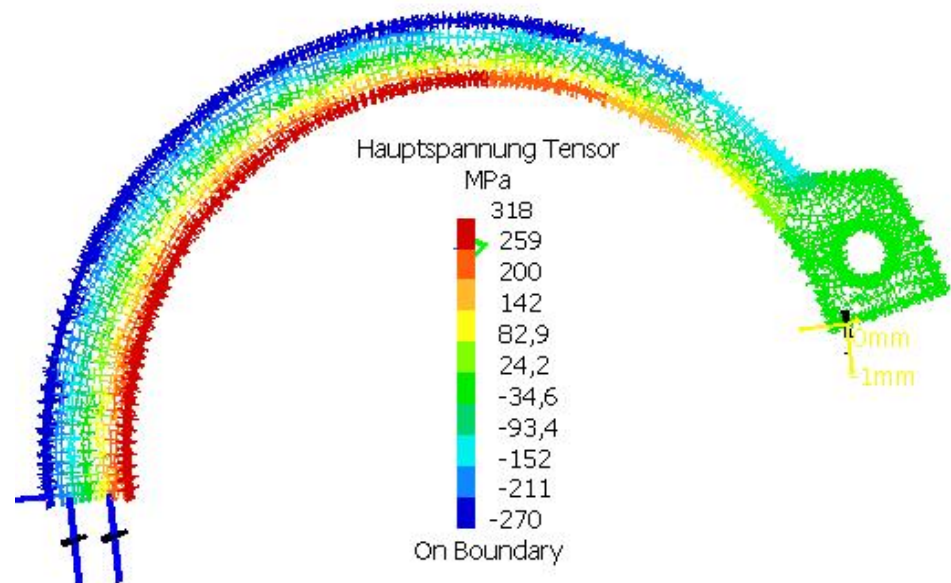
9 Übungsbeispiele GPS

Darstellung der Vergleichs-
spannungen bei Berech-
nung mit TE10-Elementen



Die maximale Spannung liegt an der Innenseite des Sicherungsrings direkt in der Symmetrieebene und beträgt ungefähr 315 N/mm^2 . Weiters interessant ist eine Analyse der Hauptnormalspannungen:

Analyse der Hauptnor-
malspannungen des Si-
cherungsrings



9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses

Die Hauptnormalspannungen zeigen deutlich die Zugspannungen an der Innenseite sowie die Druckspannungen an der Außenseite des Sicherungsrings, wobei sowohl Zug- als auch Druckspannungen in ungefähr der gleichen Größenordnung liegen.

9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses

In diesem Beispiel geht es darum, den großen Vorteil der FEM-Analyse im Rahmen des Konstruktionsprozesses aufzuzeigen. Im vorliegenden Beispiel wurde schrittweise ein Zylindergehäuse eines Kältekompressors mit Hilfe der Strukturanalyse optimiert. Der große Vorteil des CATIA-FEM-Produktes liegt darin, dass Geometrieänderungen sofort in die Berechnung einfließen können und somit die Schnittstellenproblematik zur Gänze entfällt. Das Zylindergehäuse konnte auf diese Weise der Belastung entsprechend verbessert werden, was bei gleichen Festigkeitseigenschaften zu einer Materialersparnis von ungefähr 200 Gramm pro Stück führte.

Die kritische Belastung für das Zylindergehäuse stellt die Bearbeitung der Lagerbohrung für die Kurbelwelle dar. Dabei tritt eine Normalkraft F_N von 4100N sowie ein Drehmoment von 25Nm auf. Das Zylindergehäuse ist bei dieser Bearbeitung fix eingespannt.

9.4.1 Konstruktionsvariante 1

Beginnen Sie das Übungsbeispiel mit der Datei *'Zyl_fem_geschl_ohne_rippen.CATPart'*. Dem Zylindergehäuse ist der Gusswerkstoff GG25 zugewiesen, womit die Arbeitsumgebung GPS sowie eine statische Analyse gestartet werden können.

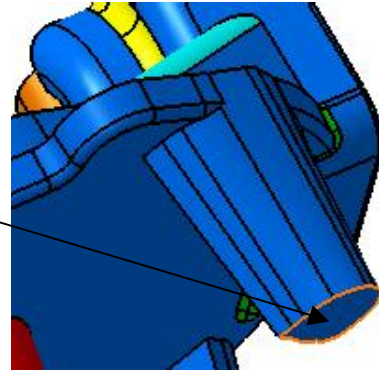
Definieren Sie nun zuerst die feste Einspannung in der Bearbeitungsvorrichtung. Das Zylindergehäuse ist an den vier unteren Flächen der Füße eingespannt. Selektieren Sie dazu das Icon für die feste Einspannung und jeweils eine Fläche.



Feste Einspannung

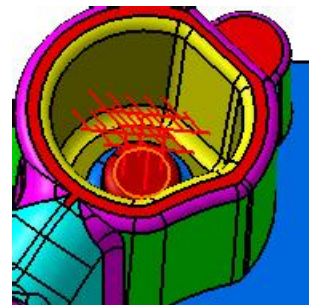
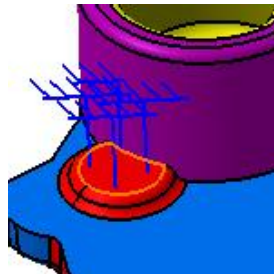
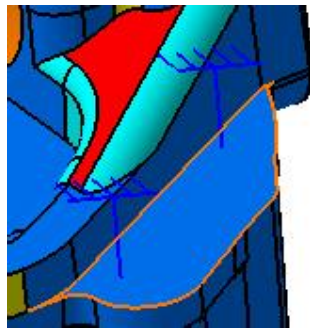
9 Übungsbeispiele GPS

Definition der festen Einspannung in der Bohrvorrichtung



An der Oberseite wird das Zylindergehäuse an drei weiteren Flächen fixiert. Verwenden Sie auch hier die feste Einspannung und selektieren Sie folgende Flächen:

Fixierte Flächen an der Oberseite des Zylindergehäuses

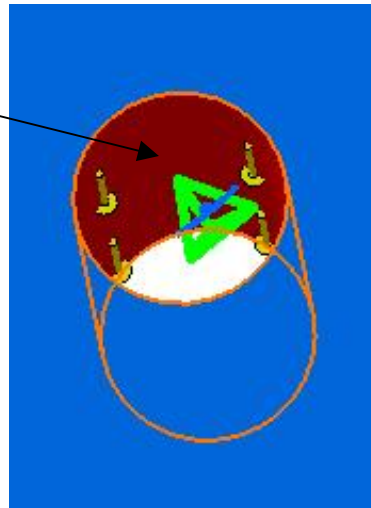
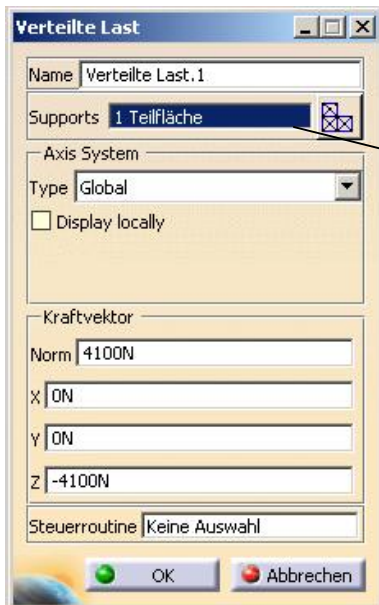


Abschließend müssen Sie noch die Belastung aufgrund der durchgeführten Bohr-operation ansetzen. Die Belastung setzt sich aus einer Normalkraft und einem Drehmoment zusammen und wirkt auf die Mantelfläche der Bohrung. Zur Definition der Normalkraft verwenden Sie das Icon 'Verteilte Kraft' und gehen folgendermaßen vor:



Verteilte Last

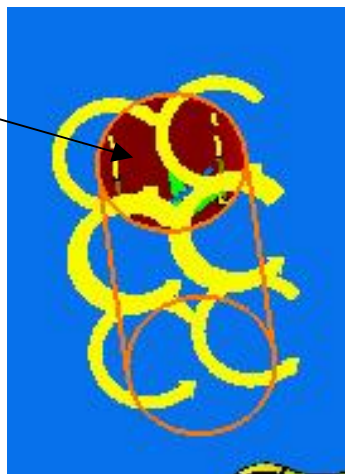
9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses



Definition der Normal-
kraft von 4100N in Z-
Richtung

Als Support selektieren Sie die Bohrungsmantelfläche und geben unter Verwendung des lokalen Koordinatensystems eine Kraft von -4100N in Z-Richtung ein.

Beim Ansetzen des Drehmoments gehen Sie analog vor:



Moment

Definition des Drehmo-
ments von 25Nm um
die Z-Achse

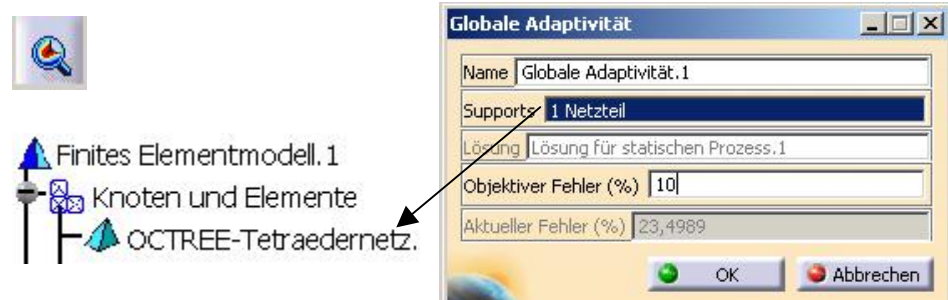
9 Übungsbeispiele GPS

Selektieren Sie wiederum die Bohrungsmantelfläche und geben Sie im globalen Koordinatensystem ein Drehmoment von 25Nm um die Z-Achse ein.

Zur Überprüfung Ihrer Eingaben können Sie auch die Datei *'Zyl_geschl_ohne_rippen.CATAnalysis'* öffnen. Wie üblich, führen Sie auch diesmal eine Berechnung mit linearen Tetraeder-Elementen durch und überprüfen die Qualität des Ergebnisses. Danach verwenden Sie TE10-Elemente mit einer Größe von 6mm und einem Durchhang von 0,8mm.

Da eine quantitative Spannungsaussage, wie bereits im Kapitel 7 erwähnt, nur bei einer globalen Adaptivität < 10% möglich ist, empfiehlt sich die Definition einer neuen globalen Adaptivitätseinheit. Dies erfolgt mit folgendem Icon:

Definition einer neuen Adaptivitätseinheit mit einem maximalen objektiven Fehler von 10%



Im daraufhin erscheinenden Eingabefenster ist der globale Fehler mit maximal 10 % anzusetzen, beim Eingabefeld für Supports ist im Strukturbaum das aktuelle OCTREE-Tetraedernetz zu selektieren.

Daraufhin ist eine neue Analyse mit dem Icon 'Mit Adaptivität berechnen', welches sich im Pulldown-Menü des Icons 'Berechnen' befindet, durchzuführen.

Starten der Berechnung mit Adaptivität und Festlegen der Parameter

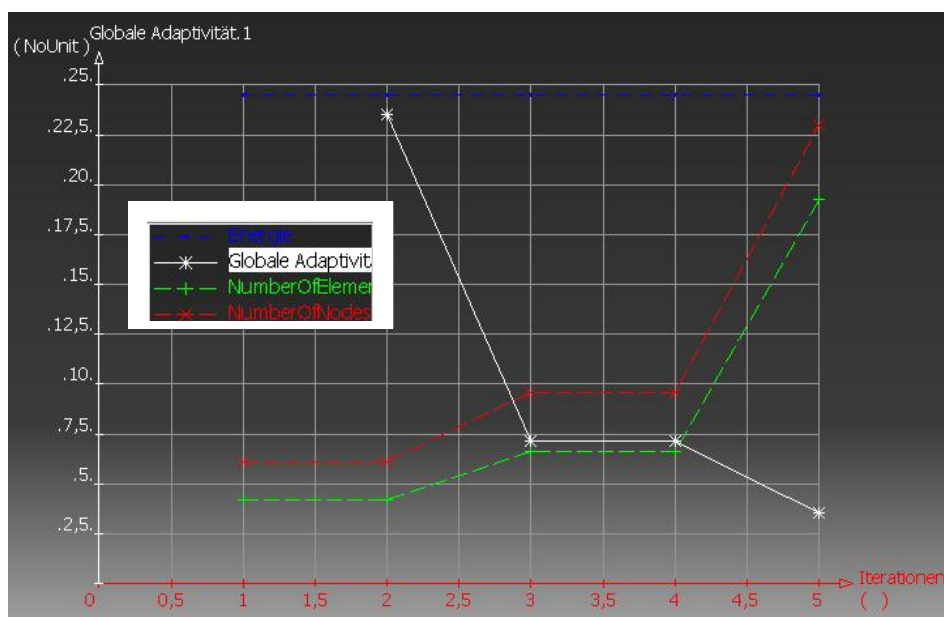


9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses

In diesem Eingabefenster wählen Sie die Anzahl der Iterationen, bis der globale Fehler auf den gewünschten Wert reduziert wurde, mit zwei, und lassen Sie eine größere Vernetzung als im Strukturbaum definiert zu. Die Berechnung wird nun erneut durchgeführt, und es wird versucht, in zwei Iterationsschritten einen objektiven Fehler von 10% zu unterschreiten.

Mit dem Icon 'Protokoll der Berechnung' kann grafisch der Verlauf des globalen Fehlers über der Anzahl der Iterationen dargestellt werden.

Im unten stehenden Bild sieht man eine Reduktion des globalen Fehlers in vier Schritten von 23% auf 3%. Die Anzahl der Elemente sowie der Knoten ist dabei natürlich entsprechend gestiegen und ebenfalls dem Diagramm zu entnehmen.



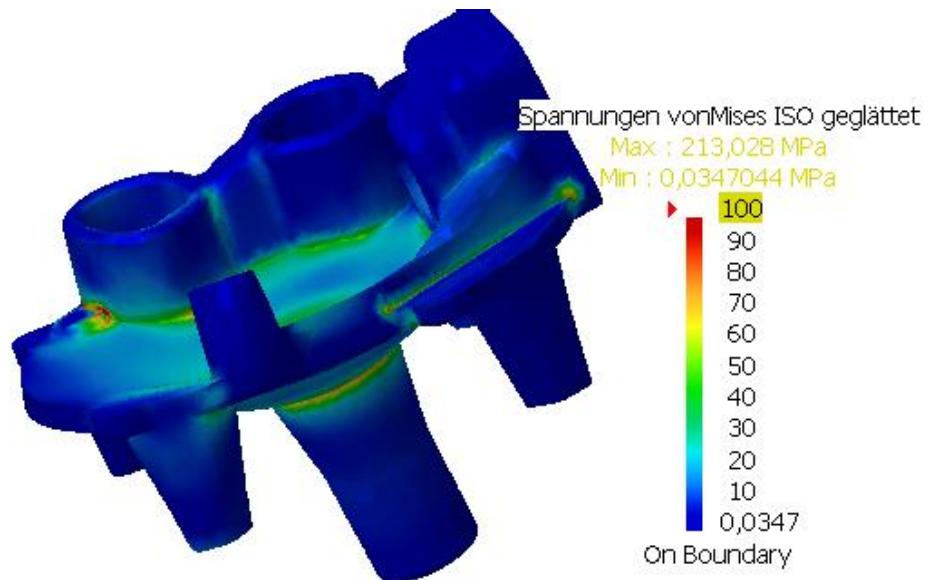
Grafische Darstellung des objektiven Fehlers sowie der Anzahl der Elemente und Knoten über den durchgeführten Iterationen

Mit dieser Vorgangsweise wurde auch in diesem Beispiel der globale Fehler auf ca. 8% reduziert, was nunmehr eine quantitative Spannungs- bzw. Verformungsanalyse möglich macht.

Die errechneten Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt:

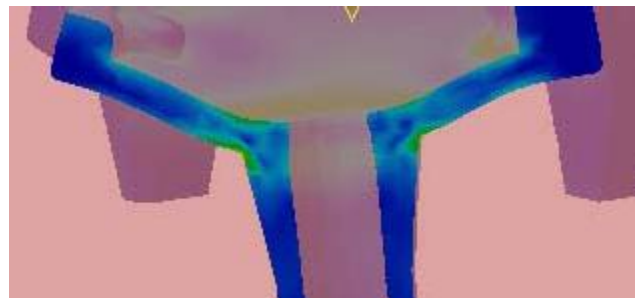
9 Übungsbeispiele GPS

Spannungsverteilung beim Bohren des Kurbelwellenlagers, Berechnung mit TE10-Elementen



Ein Schnitt im Bereich der Lagerbohrung ergibt folgenden Spannungsverlauf:

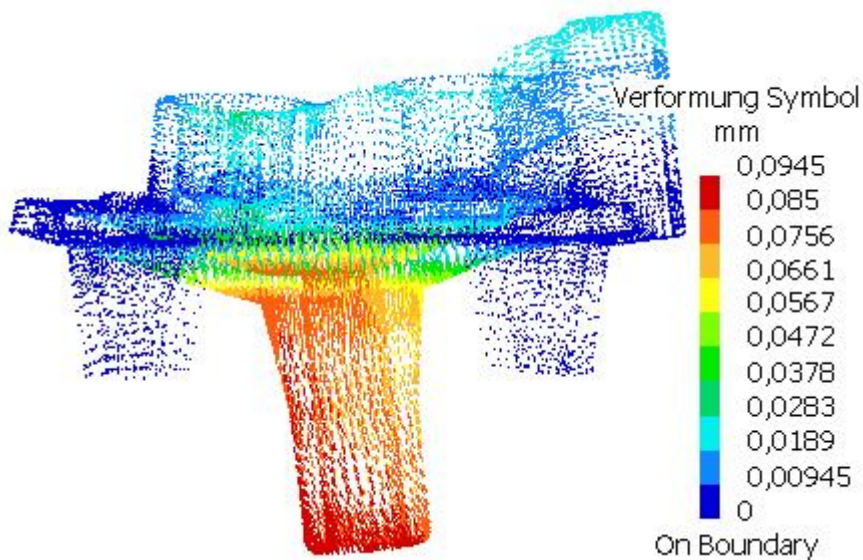
Schnitt durch die Lagerstelle mit dargestellter Spannungsverteilung



Die auftretenden maximalen Spannungen liegen im Bereich von 200 N/mm^2 und sind damit noch nicht im kritischen Bereich, in dem plastische Verformungen auftreten.

Sehr wichtig ist in diesem Fall auch eine Analyse der Verformungen, speziell im Bereich des Lagerflansches.

9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses



Verformung des Zylindergehäuses; maximal 94µm im Bereich des Lagerflansches

Deutlich ist ein Wegdriften des Lagerflansches in Richtung der steiferen Struktur sichtbar. Die maximale Verformung beträgt in diesem Fall 94µm und wird bei einer nachfolgenden Feinbearbeitung mit wesentlich geringeren Kräften korrigiert. Sie liegt damit im zulässigen Bereich.

Eine Analyse der Trägheitseigenschaften des Zylindergehäuses in dieser Ausführung in der Arbeitsumgebung 'Part Design' ergibt eine Masse von 1510 Gramm. Verwenden Sie dazu das Icon 'Trägheit messen'.



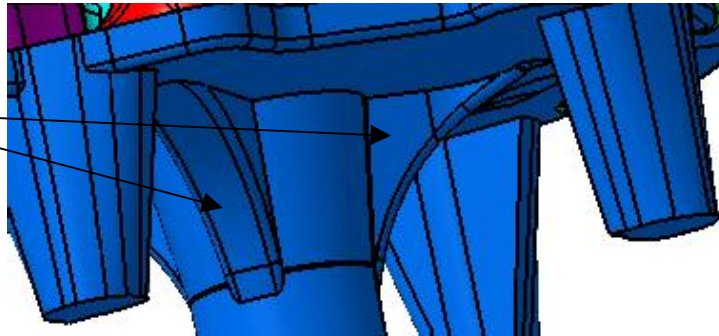
Trägheit messen in der Arbeitsumgebung Part Design.

9.4.2 Konstruktionsvariante 2

In einem ersten Optimierungsschritt wurde die Struktur des Zylindergehäuses durch die Verwendung von zusätzlichen Versteifungsrippen, die vom Flanschlager zu den Befestigungsfüßen verlaufen, verbessert.

9 Übungsbeispiele GPS

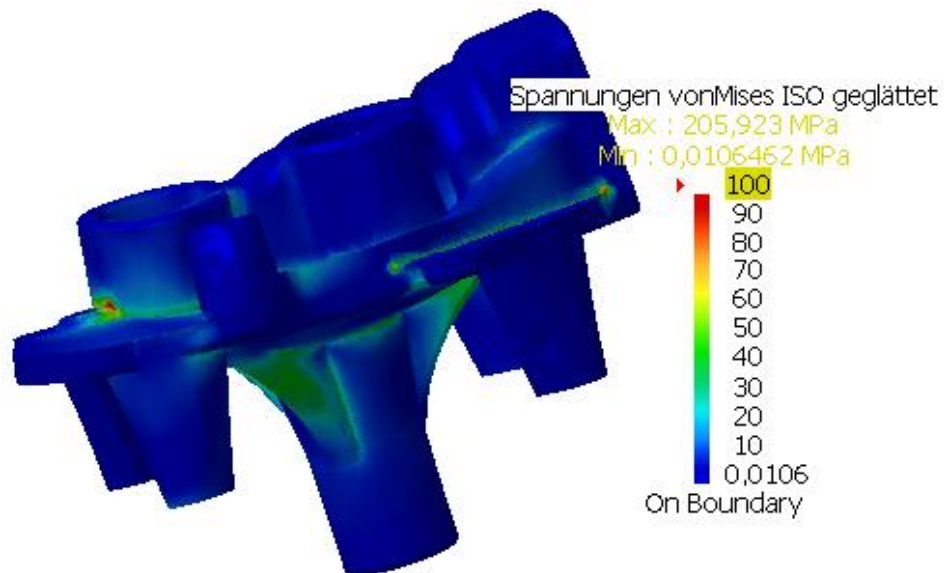
Versteifung der Struktur
mit zusätzlichen Rippen



Diese Variante erhalten Sie nach dem Öffnen der Datei *'Zyl_fem_geschl_mit_rippen.CATPart'*. Die Randbedingungen der Aufspannung sowie der Lasteinleitung bleiben unverändert und sind analog zum ersten Schritt zu definieren.

Nach der Definition dieser Bedingungen können Sie die Berechnung durchführen. Verwenden Sie wieder parabolische Tetraeder-Elemente mit einer Größe von 6mm und einem Durchhang von 0,8mm. Sie können dazu auch die Datei *'Zyl_geschl_mit_rippen.CATAnalysis'* verwenden. Die Berechnungsergebnisse sehen nun folgendermaßen aus:

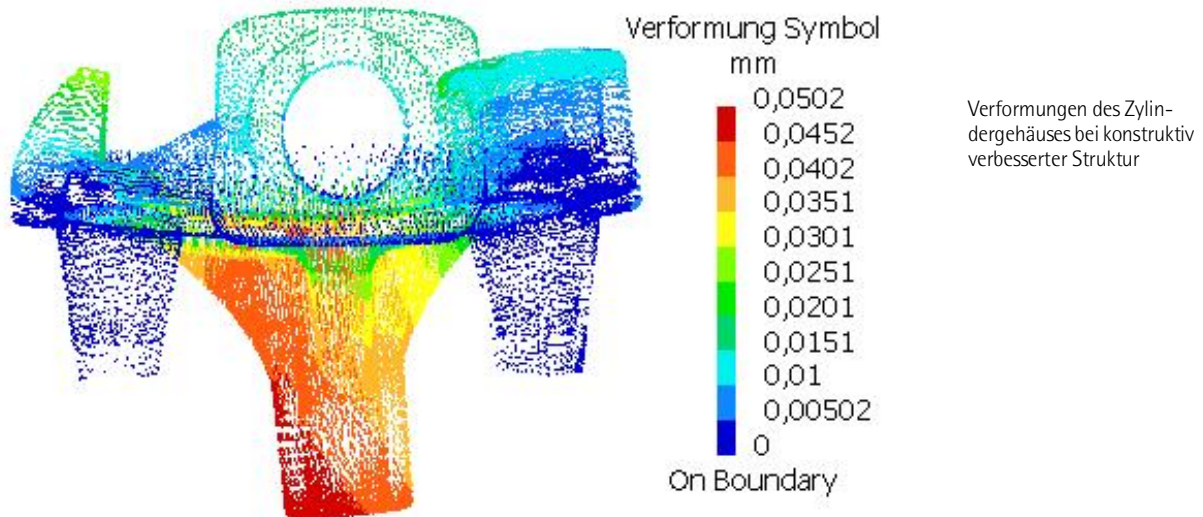
Spannungsverteilung
bei Versteifung mit drei
Rippen; TE10-Elemente
(objektiver Fehler
< 10%)



Die maximalen Spannungen liegen wiederum bei ungefähr 200 N/mm^2 , jedoch sind die Spannungen im Bereich des Flanschlaggers aufgrund der Versteifung der Struktur eindeutig reduziert.

9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses

Eine noch anschaulichere Verdeutlichung der Bauteiloptimierung zeigt sich bei einer Analyse der auftretenden Verformungen.



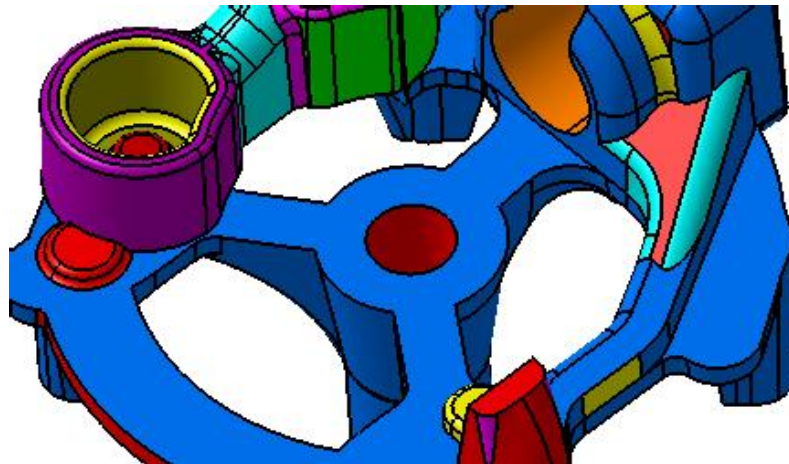
Es zeigt sich wiederum ein Abweichen des Flanschlagers in Richtung der steiferen Struktur, jedoch in diesem Fall nur mehr im Bereich von $50\mu\text{m}$, was eine Verbesserung gegenüber der Variante ohne Rippen im Ausmaß von nahezu 50% erbrachte.

9.4.3 Konstruktionsvariante 3

In einem weiteren Schritt wurde nun versucht, unnötiges Material einzusparen und so die Kosten des Bauteils zu reduzieren. Dazu wurden in der ebenen Platte des Zylindergehäuses drei möglichst große Ausnehmungen vorgesehen. Eine Analyse der nunmehrigen Masse des Zylindergehäuses erbrachte einen Wert von 1322 Gramm. Dies ergibt bereits eine Einsparung von 188 Gramm gegenüber der ersten Variante. Nun soll natürlich eine Strukturanalyse mit der neuen Bauteilgeometrie durchgeführt werden.

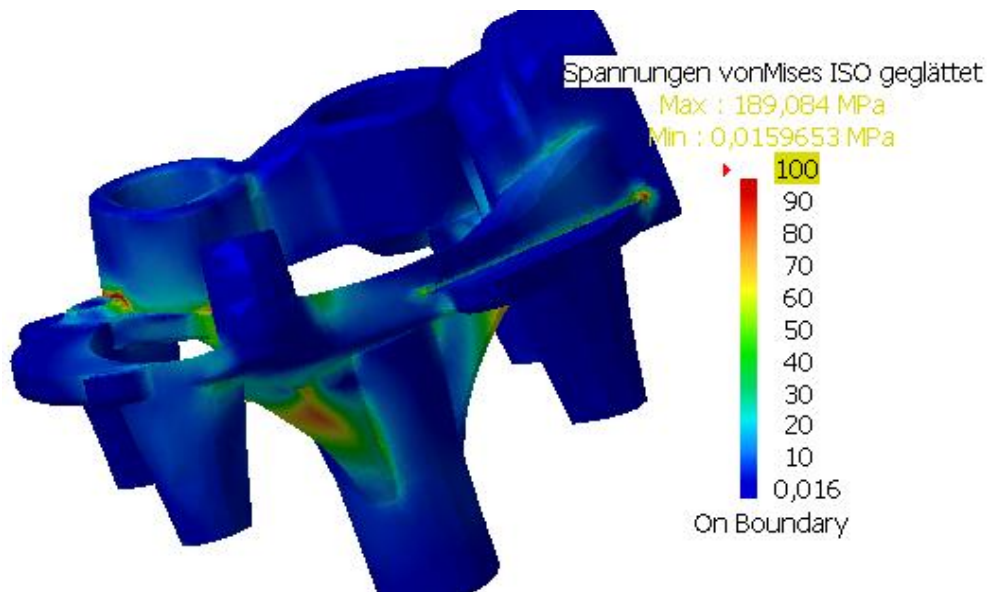
9 Übungsbeispiele GPS

Ausnehmungen zur
Materialeinsparung



Dazu öffnen Sie die Datei '*Zyl_fem_mit_ausnehm.CATPart*'. Die Randbedingungen sind identisch zu den vorherigen beiden Beispielen anzusetzen und können mit der Datei '*Zyl_mit_ausnehm.CATAnalysis*' nachvollzogen werden. Nach deren Definition starten Sie die Berechnung. Verwenden Sie auch diesmal parabolische Tetraeder-Elemente mit einer Größe von 6mm und einem SAG-Wert von 0,8mm. Nach erfolgreicher erster Berechnung definieren Sie wiederum eine globale Adaptivität und erlauben einen objektiven Fehler von 8 %.

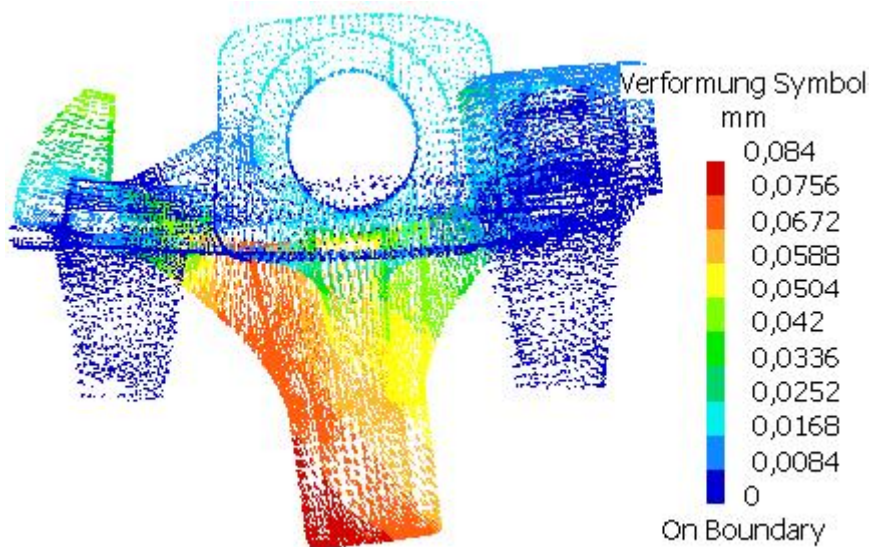
Spannungsverteilung
beim Zylindergehäuse
mit drei Ausnehmungen
(objektiver Fehler <
10%)



9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses

Die Ergebnisse der Analyse nach einer Berechnung mit Adaptivität (globaler Fehler wiederum kleiner als 10%) zeigen, dass die auftretenden Spannungen mit dieser Konstruktion sogar leicht reduziert werden konnten und nun bei maximal 190N/mm^2 liegen.

Noch wichtiger ist allerdings die Analyse der Verformungen:



Analyse der Verformungen im Bereich des Flanschlagers

Hier sieht man, dass die Verformungen gegenüber der vorigen Ausführung wieder zugenommen haben, jedoch mit einer Abweichung von maximal $84\mu\text{m}$ des Flanschlagers noch unter dem Ausgangswert von $94\mu\text{m}$ liegen und sich damit im zulässigen Bereich befinden.

9.4.4 Konstruktionsvariante 4

In einem letzten Schritt wurde noch der hintere Verbindungssteg des Zylindergehäuses entfernt.



Konstruktive Entfernung des Verbindungsstegs im hinteren Bereich des Zylindergehäuses

9 Übungsbeispiele GPS

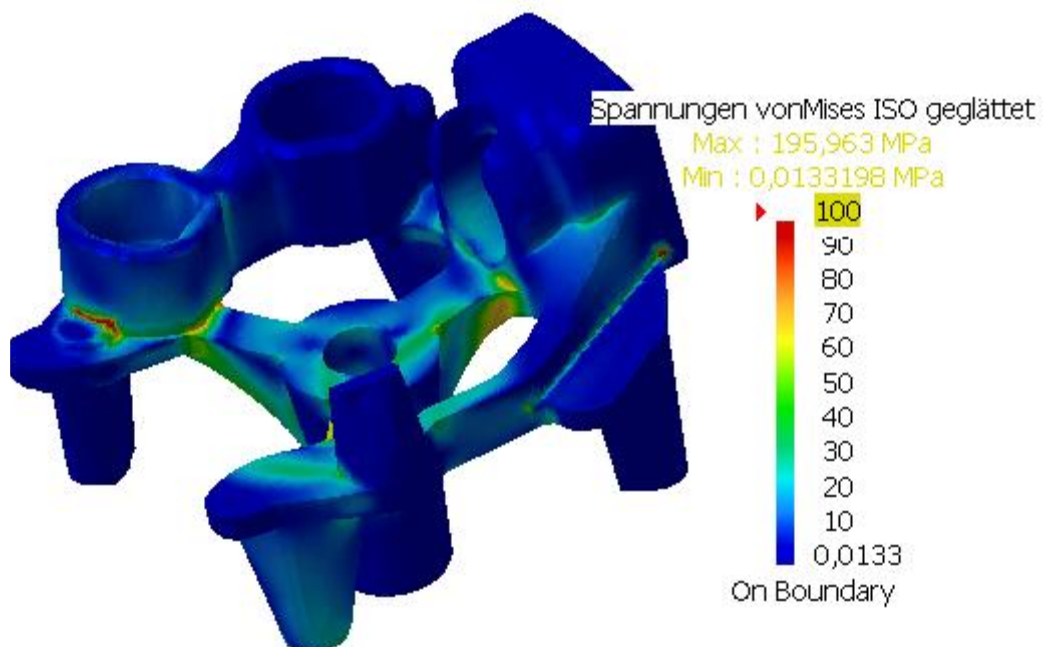
Schlussendlich ergibt sich damit eine Masse des Zylindergehäuses von 1280 Gramm, was eine Reduktion gegenüber der ursprünglichen Variante von 230 Gramm des Werkstoffs GG20 bedeutet. Bei einer jährlichen Produktionsmenge von im vorliegenden Fall 6 Millionen Stück ergibt das eine enorme Kosteneinsparung und zeigt, wie wichtig eine eingehende Strukturanalyse bereits im Konstruktionsprozess ist.

Starten Sie die Analyse mit dem Öffnen des Modells *'Zyl_fem_fertig.CATPart'*. Auch in diesem Fall sind die Randbedingungen identisch zur ersten Berechnung und Sie können mit der Datei *'Zyl_fem_fertig.CATAnalysis'* überprüfen, ob es Ihnen gelungen ist, sie korrekt zu definieren.

Gehen Sie auch bei dieser Berechnung vor wie zuvor beschrieben. Gestartet wird mit linearen Elementen, sodann das Netz auf parabolische Tetraeder-Elemente verfeinert und schließlich eine Adaptivität mit einem globalen Fehler < 10% definiert.

Die Ergebnisse, die eine quantitative Spannungsangabe zulassen, sind in den nächsten Bildern dargestellt:

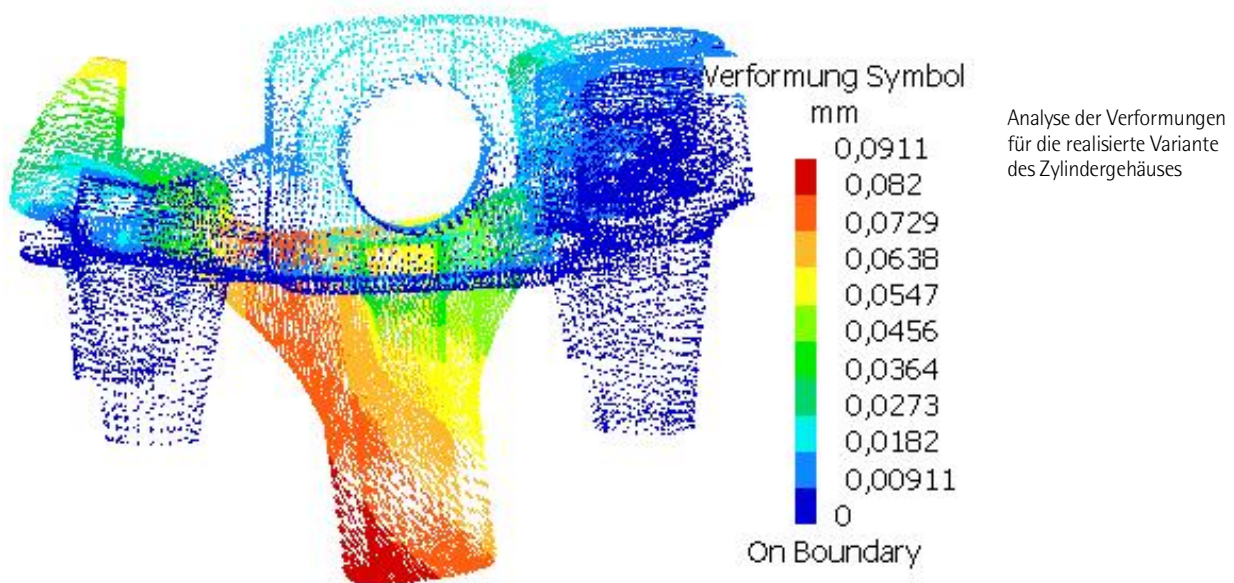
Spannungsverteilung
beim Zylindergehäuse
ohne Verbindungssteg
(TE10-Elemente; objekti-
ver Fehler < 10%)



9.4 Optimierung eines Zylindergehäuses

Die größten Spannungen liegen im Bereich der Rippen und sind nur unmerklich angestiegen. Der Maximalwert tritt an der Anbindung der linken unteren Versteifungsrippe zur Druckkammer auf und liegt im Bereich von 195N/mm^2 .

Zuletzt werden noch die auftretenden Verformungen, die bei dem Bohrvorgang auftreten, untersucht.



Die maximale Verformung des Flanschlagers liegt nun bei $91\mu\text{m}$, das ist um $4\mu\text{m}$ weniger als bei der Ausgangsversion. Wenn man berücksichtigt, dass eventuell bleibende Verformungen der Lagerbohrung in einer nachfolgenden Feinbearbeitung korrigiert werden, ist das ein durchaus akzeptabler Wert.

Abschließend sei nochmals erwähnt, dass die Geometrieänderungen direkt in der Arbeitsumgebung Part Design durchgeführt wurden und anschließend sofort eine neue FEM-Analyse im GPS-Modul durchgeführt werden konnte. Dies bedeutet den Wegfall sämtlicher Schnittstellenproblematik, vermeidet damit Datenverluste und macht somit eine Strukturanalyse einfach und auch kostengünstig.

9 Übungsbeispiele GPS

Die Strukturanalyse sollte dabei direkt in den Konstruktionsprozess eingegliedert werden und auch die Gegebenheiten der Fertigung berücksichtigen. Damit lässt sich eine wesentliche Verkürzung der Produktentwicklungsphase erreichen.

10 Baugruppenberechnung (GAS)

In diesem Kapitel wird die Vorgangsweise bei der FEM-Berechnung von Baugruppen beschrieben. Die dazu notwendige Arbeitsumgebung GAS (Generative Assembly Structural Analysis) ist identisch mit der GPS-Arbeitsumgebung. Das heißt, die benötigten Symbolleisten sind in der Plattform P2 bei Vorhandensein einer entsprechenden Lizenz in der GPS-Umgebung eingebunden. In der Plattform P1 ist eine Analyse von Baugruppen nicht möglich.

Mit den Befehlen der GAS-Arbeitsumgebung ist eine Spannungs- und Verformungsanalyse sowie eine Frequenzberechnung von Baugruppen möglich. Voraussetzung ist, dass die einzelnen Bauteile der Baugruppe in einem Produkt zusammengefasst sind. Weiters müssen die Bauteile untereinander mit entsprechenden Assembly-Bedingungen oder mit eigens generierten Analysis-Connection-Verbindungen versehen werden, um eine Definition der Randbedingungen innerhalb der Baugruppe zu ermöglichen.

10.1 Bedingungen in der Baugruppe

Um in weiterer Folge die Randbedingungen für eine FEM-Analyse vergeben zu können, müssen innerhalb der Baugruppe die Teile positioniert sein. Dies kann auf zwei Arten erfolgen:

- Mit Bedingungen im Assembly Design
- Mit den Analysis-Connection-Verbindungen

10.1.1 Bedingungen im Assembly Design

Für die FEM-Analyse können folgende Bedingungen, die in der Arbeitsumgebung 'Assembly Design' vergeben wurden, weiterverwendet werden:



Kongruenzbedingung



Kontaktbedingung



Offset-Bedingung

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Diese Assembly-Bedingungen können mit den Randbedingungen des GAS-Arbeitsbereiches kombiniert werden. Welche Kombinationen dabei möglich sind, zeigt eine Übersichtstabelle in Kapitel 10.3.

10.1.2 Analysis-Connection Bedingungen

Eine weitere Möglichkeit, die Relation zwischen Bauteilen zu definieren, ergibt sich im Arbeitsbereich 'Analysis Connection'. Diese Arbeitsumgebung kann auf folgende Weise gestartet werden:



- Über das Icon in den Favoriten
- Über Start Analyse & Simulation - Analysis Connection

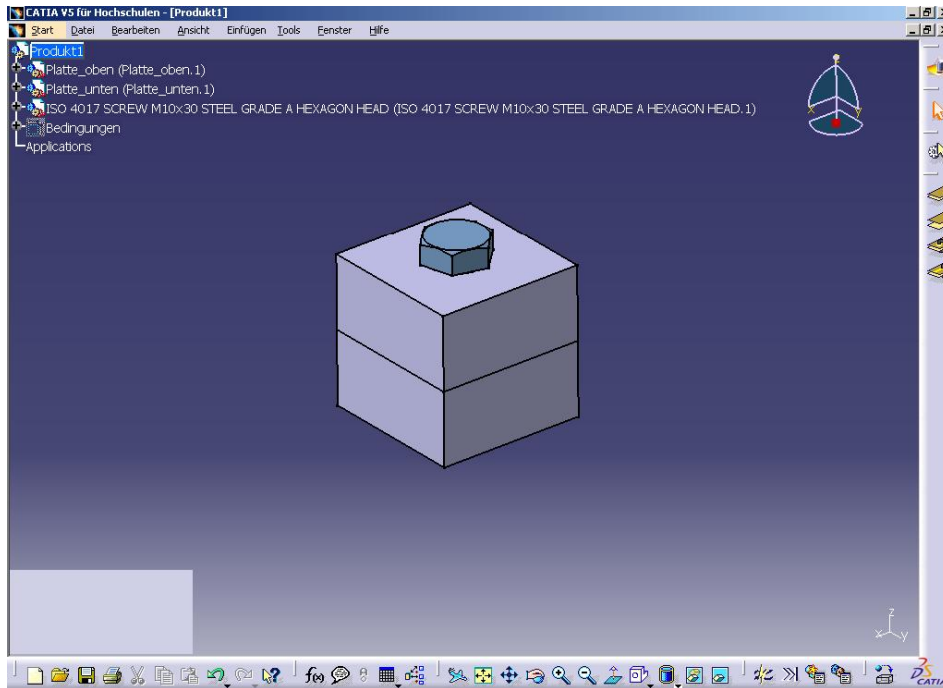
Der Aufruf dieser Arbeitsumgebung sollte erst erfolgen, nachdem das gewünschte Produkt zur Gänze zusammengespielt und positioniert wurde. Ab der CATIA-Release R12 ist diese Arbeitsumgebung unter Analyse & Simulation nicht mehr vorhanden. Der Aufruf über die Favoriten ist jedoch weiterhin möglich, das Bild wird allerdings nicht mehr angezeigt:

Analysis
Connection
Button ab
Release R12



Nach dem Start der Arbeitsumgebung 'Analysis Connection' erhält man folgende Oberfläche:

10.1 Bedingungen in der Baugruppe



Oberfläche der Arbeitsumgebung 'Analysis Connection'

Die zur Verfügung stehenden Icons werden nun erläutert:



Verbindung der Teilfläche-Teilfläche-Analyse



Verbindung der allgemeinen Analyse



Verbindung der Punktschweißanalyse



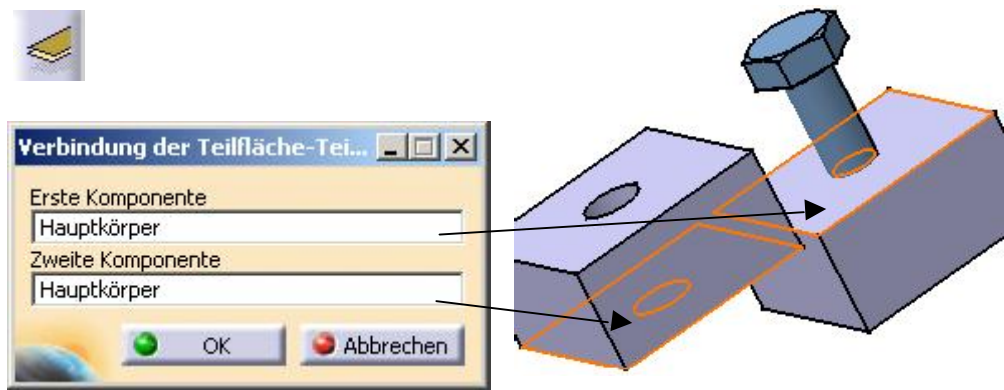
Verbindung der Nahtschweißanalyse

10 Baugruppenberechnung (GAS)

10.1.2.1 Verbindung mit Flächenkontakt(Analysis Connect)

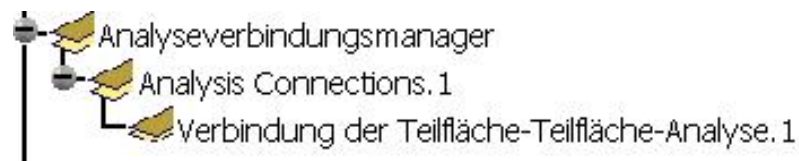
Um diese Verbindung definieren zu können, müssen die Teile so positioniert sein, dass die selektierten Flächen tatsächlich zusammenfallen. Dies ist vor allem bei Ausrichtung der Teile über den Kompass zu beachten. Selektiert werden können sowohl ebene als auch zylindrische Flächen. Die Vorgangsweise stellt sich wie folgt dar:

Teilfläche-Teilfläche-
Verbindung mit Flächen-
kontakt



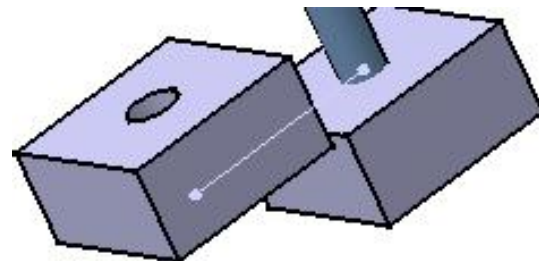
Nach Selektion der beiden gewünschten Teilflächen und Bestätigung durch 'OK' erscheint im Strukturbaum folgender Eintrag:

Eintrag der Verbindung
im Strukturbaum



Auch im Zeichenbereich wird die soeben definierte Verbindung dargestellt:

Darstellung der Verbin-
dung im Zeichenbereich



10.1 Bedingungen in der Baugruppe

Es empfiehlt sich jedoch, den Namen der Verbindung im Strukturbaum zu ändern und eine aussagekräftige Bezeichnung einzugeben. Dies erleichtert in weiterer Folge die Zuordnung enorm. Die Änderung der Bezeichnung erfolgt über einen Aufruf des Kontextmenüs und 'Eigenschaften' für den entsprechenden Eintrag im Strukturbaum:



Vergabe eines neuen Namens für die Verbindung

In der Kartei 'Komponenteneigenschaften' ist anschließend der gewünschte Name einzutragen, der dann auch im Strukturbaum aufscheint:



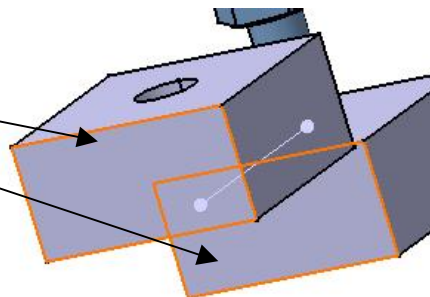
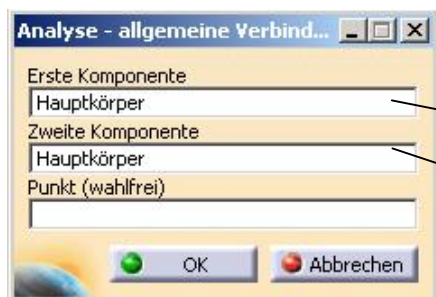
Neue Bezeichnung der Verbindung im Strukturbaum

10.1.2.2 Allgemeine Verbindung ohne Flächenkontakt

Bei dieser Verbindungsart ist es nicht notwendig, dass die gewählten Flächen zusammenfallen. Die Vorgangsweise zur Definition ist folgende:



Verbindung der allgemeinen Analyse



Definition einer allgemeinen Verbindung

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Nach erfolgreicher Definition wird sowohl im Zeichenbereich als auch im Strukturbaum die neu erzeugte Verbindung angezeigt. Auch hier ist es sinnvoll, einen sprechenden Namen zu verwenden.

Ab CATIA V5.12 ist dieses Icon 'Analyse allgemeiner Verbindungen' auch in der GPS-Arbeitsumgebung verfügbar und die Anwendung erfolgt vollkommen analog.



Analyse allgemeiner Verbindungen

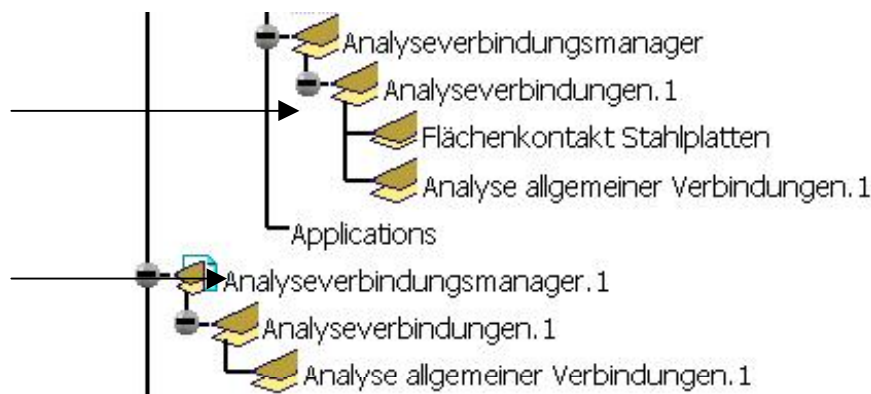
Definition einer allgemeinen Verbindung in der GPS-Arbeitsumgebung



Der Name kann nun allerdings bereits im Eingabefenster geändert werden, und die Darstellung im Zeichenbereich erfolgt anstatt in weißer in oranger Farbe. Bedingungen, die direkt in der GPS-Arbeitsumgebung erzeugt wurden, werden allerdings im Strukturbaum an oberster Stelle direkt dem Analysemanager zugeordnet, wohingegen Bedingungen aus 'Analysis Connection' dem Produkt untergeordnet werden.

Darstellung der in 'Analysis Connection' erzeugten Verbindungen

Darstellung der in GPS erzeugten Bedingungen



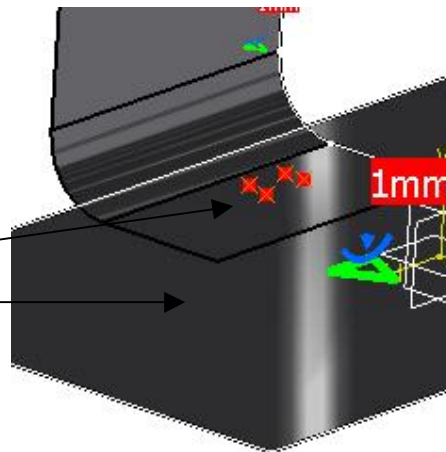
10.1 Bedingungen in der Baugruppe

10.1.2.3 Punktschweißverbindung

Dieses Icon ist sowohl in der 'Analysis Connection'- als auch in der GAS-Arbeitsumgebung verfügbar. Es kann damit eine Verbindung für eine Punktschweißung definiert werden:

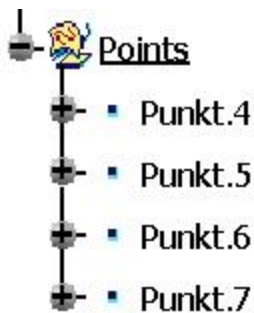


Analyse Punktverbindungen



Definition einer Punktverbindung

Im Eingabefeld für die erste bzw. zweite Komponente sind die jeweiligen Stützflächen zu selektieren. Beim Feld 'Punkte' sind die entsprechenden Schweißpunkte zu definieren. Diese Punkte müssen sich in einem geöffneten Körper befinden:

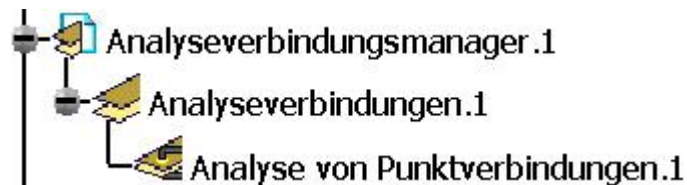


Selektierbare Punkte in einem geöffneten Körper

Nach erfolgter Definition erscheint im Strukturbaum sowie im Zeichenbereich wiederum der Eintrag für die Verbindung:

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Darstellung der
Punktverbindung im
Strukturbaum und im
Zeichenbereich



Die Definition einer Punktverbindung ist auch innerhalb eines Teils möglich.

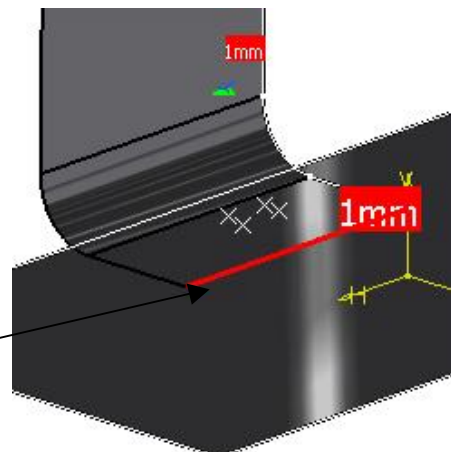
10.1.2.4 Schweißnahtverbindung

Mit diesem Icon kann eine Verbindung für eine Schweißnaht erzeugt werden. Es ist wiederum in beiden Arbeitsumgebungen vorhanden. Folgende Vorgangsweise ist zu durchlaufen:



Analyse Linienverbindung

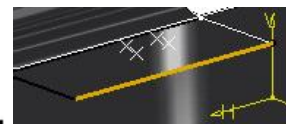
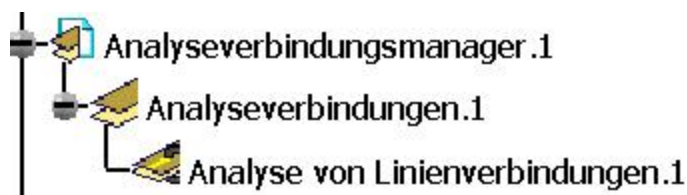
Definition einer
Linienverbindung
zur Abbildung ei-
ner Schweißnaht



Es ist wieder eine Selektion beider Bauteile durchzuführen und im Eingabefeld 'Linien' die gewünschte Linie zur Definition der Schweißnaht zu markieren.

Die Bedingung ist im Strukturbaum und im Zeichenbereich ersichtlich:

Darstellung der
Linienverbindung



10.2 Verbindungen zwischen zwei Teilen

Auch hier ist die Definition einer Linienverbindung innerhalb eines Bauteils möglich. Das entsprechende Icon hat das gleiche Aussehen:



Analyse von Linienverbindungen in einem Teil

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Definition von Analyseverbindungen sowohl in der Arbeitsumgebung 'Analysis Connection' als auch in der GAS-Arbeitsumgebung erfolgen kann, wobei das Icon 'Verbindung Teilfläche-Teilfläche-Analyse', welches zur Definition eines Flächenkontaktes verwendet wird, nur in der Arbeitsumgebung 'Analysis Connection' verfügbar ist. Andererseits besteht nur in der GAS-Umgebung die Möglichkeit, eine Schweißverbindung innerhalb eines Teils zu definieren. Es bleibt dem Benutzer überlassen, sich seine bevorzugte Arbeitsweise zurechtzulegen.

10.2 Verbindungen zwischen zwei Teilen

Mit allen Befehlen in dieser Symbolleiste der GAS-Arbeitsumgebung wird die mechanische Eigenschaft einer Verbindung von zwei Bauteilen innerhalb einer Baugruppe definiert. Folgende Möglichkeiten stehen zur Auswahl:



Eigenschaft der fixierten Verbindung



Eigenschaft der Gleitverbindung



Eigenschaft der Kontaktverbindung



Eigenschaft der fixierten Federverbindung



Eigenschaft der Presspassverbindung

10 Baugruppenberechnung (GAS)

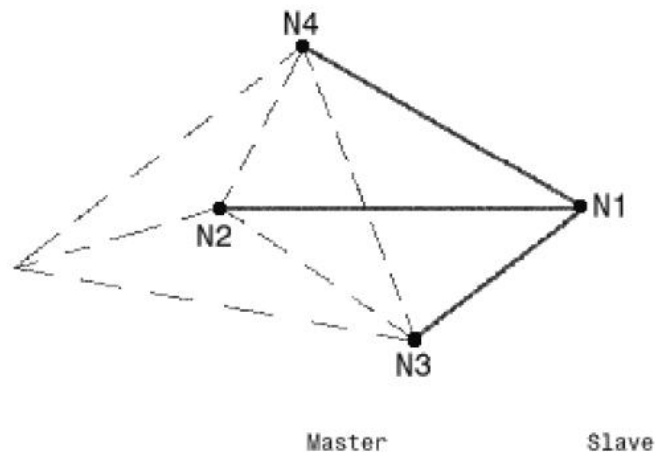


Eigenschaft der Verbindung mit Festdrehen von Bolzen

10.2.1 Eigenschaft der fixierten Verbindung

Damit wird eine starre Verbindung zwischen zwei Bauteilen abgebildet. Die Bezugsgeometrien sind deckungsgleich und die Bauteile sind an diesen Geometrien fix miteinander verbunden. Vom Standpunkt der FEM-Berechnung entspricht dies einem Verschmelzen der Knoten, die an der Bezugsgeometrie liegen. Da die Bauteile jedoch separat vernetzt werden, wird ein Übergangsnetz definiert, in welchem die Knoten miteinander verbunden werden. Die Bezugsgeometrien selbst sind bauteil-elastisch. Anwendungsbeispiele sind Schweißverbindungen, Passungen (ohne Berücksichtigung von Übermaß) und Schraubverbindungen (ohne Berücksichtigung der Vorspannkraft). Der prinzipielle Aufbau des Verbindungsnetzes sieht folgendermaßen aus:

Prinzipieller Aufbau des Verbindungsnetzes bei der fixierten Verbindung



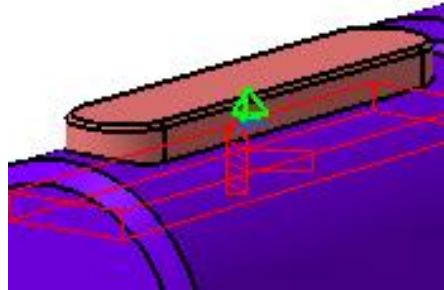
Das Element besteht aus einem Slave- und $n-1$ Master-Knoten und verhält sich kinematisch.

Bei der Definition einer fixierten Verbindung sind folgende Vorgangsweisen möglich:

10.2 Verbindungen zwischen zwei Teilen



Fixierte Verbindung



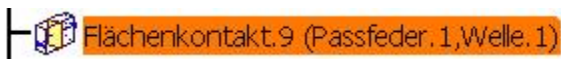
Definition einer fixierten Verbindung

Als Stützelement kann zwischen zwei Selektionen unterschieden werden:

- Man selektiert eine entsprechende Analyseverbindung



- Man selektiert eine entsprechende Baugruppenbedingung



Die Analyseverbindung kann entweder im Strukturbaum oder im Zeichenbereich selektiert werden.

Die Baugruppenbedingung muss zur Definition einer fixierten Verbindung eine Kontaktbedingung sein, die sich auf die beiden relevanten Flächen bezieht.

Man sieht, dass der Arbeitsaufwand reduziert werden kann, falls schon bei der Vergabe der Baugruppenbedingungen die späteren Randbedingungen der FEM-Analyse mit berücksichtigt werden. Somit ist nämlich eine Definition der Analyseverbindungen nicht notwendig.

10.2.2 Eigenschaft der Gleitverbindung

Mit diesem Befehl wird eine Gleitverbindung zwischen zwei Bauteilen definiert, womit eine Relativbewegung zwischen den beiden Teilen erfolgen kann. Es ist eine Verschiebung in der Tangentialebene zur Verbindungsfläche möglich. Damit wird die kinematische Relation berücksichtigt. Anwendungsbeispiel ist die Abbildung eines Gleitlagers und die Wellen-Nabenverbindung mit Spiel. Der prinzipielle Aufbau

10 Baugruppenberechnung (GAS)

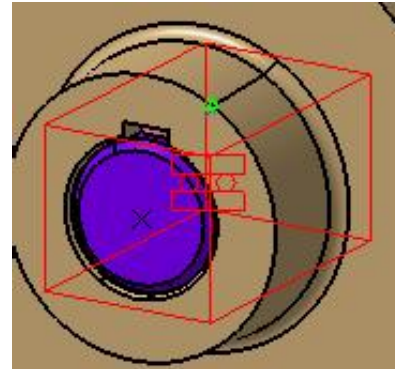
dieses Verbindungselements ist gleich wie beim zuvor beschriebenen. Das Element hat drei translatorische Freiheitsgrade je Knoten und verhält sich kinematisch.

Bei der Definition der Eigenschaft einer Gleitverbindung ist wie folgt vorzugehen:

Definition der Eigenschaft einer Gleitverbindung



Gleitverbindung



Das Stützelement kann wiederum auf zwei Arten definiert werden:

- Man selektiert eine entsprechende Analyseverbindung.



Kontakt_Welle-Nabe_zylindrisch

- Man selektiert eine entsprechende Baugruppenbedingung.



Flächenkontakt_zylindrisch (Welle.1,Nabe.1)

Falls eine Baugruppenbedingung selektiert werden soll, muss diese zuvor als Flächenkontakt der Zylindermantelflächen von Welle und Nabe definiert werden.

10.2.3 Eigenschaft der Kontaktverbindung

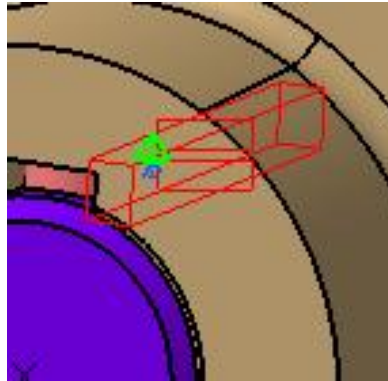
Die Kontaktverbindung ist eine Verbindung zwischen zwei Bauteilen, bei der ein gegenseitiges Ineinanderdringen der beiden Bezugsflächen verhindert wird. Die beiden Teile können sich ansonsten beliebig, in der Richtung relativ zueinander, bewegen. Mit dieser Bedingung werden Druckkräfte normal auf die Bezugsgeometrie übertragen. Durch diese Berücksichtigung der mechanischen Relationen ist eine genaue Berechnung der Verbindungsgeometrie möglich. Das finite Element ist wiederum ein Join-Element (Verbindungselement), das die Verbindung eines Knotens mit der Fläche eines anderen Elements ermöglicht.

Bei der Definition der Kontaktverbindung ist folgende Vorgangsweise einzuhalten:

10.2 Verbindungen zwischen zwei Teilen



Kontaktverbindung



Definition einer Kontaktverbindung

Wiederum ist die Auswahl der Bezugsgeometrie auf zwei Arten möglich:

- Man selektiert eine entsprechende Analyseverbindung.



Flächenkontakt_Passfeder-Nabe1

- Man selektiert eine entsprechende Baugruppenbedingung.



Flächenkontakt.14 (Passfeder.1,Nabe.1)

Das Eingabefeld 'Sicherheitsbereich' ermöglicht die Definition eines Spiels zwischen den beiden Teilen. Erst nachdem dieser Sicherheitsbereich aufgebraucht ist, kommt es zum direkten Kontakt.

10.2.4 Eigenschaft der fixierten Federverbindung

Eine Federverbindung ist eine elastische Verbindung zwischen den Bezugsgeometrien zweier Körper. Diese Verbindung berücksichtigt die elastische Verformbarkeit der Schnittstelle. Auch in diesem Fall wird ein Verbindungsnetz mit Join-Elementen generiert.

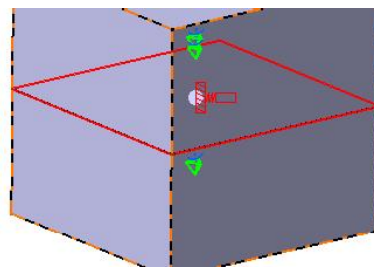
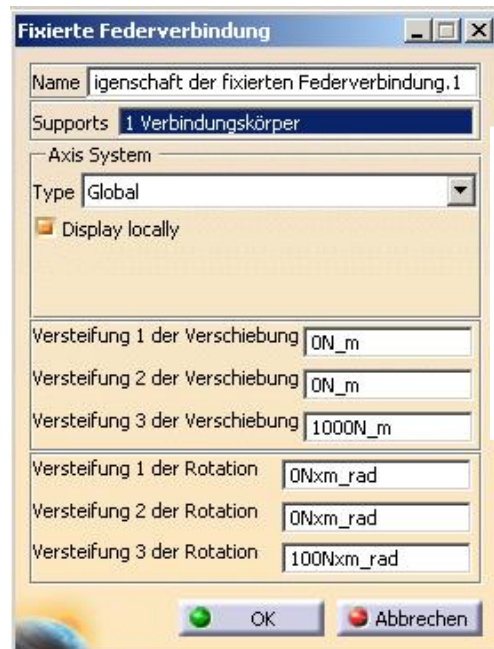
Bei der Definition der Federverbindung empfiehlt sich die angeführte Vorgangsweise:

10 Baugruppenberechnung (GAS)



Federverbindung

Definition einer
Federverbindung



Das Stützelement ist wiederum entweder eine Analyseverbindung oder eine Kontaktbedingung. Im Eingabefenster ist weiters das Koordinatensystem festzulegen, und die entsprechenden Federsteifigkeiten sind einzugeben.

10.2.5 Eigenschaft der Presspassverbindung

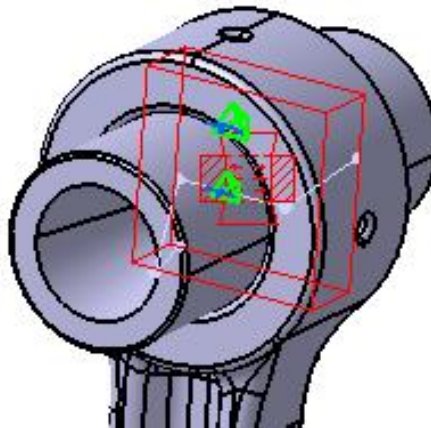
Mit diesem Befehl kann eine Presspassung zwischen zwei Teilen definiert werden. Vom Verhalten ist diese Verbindung ähnlich der Kontaktverbindung, allerdings ist zusätzlich zur Einschränkung des axialen Freiheitsgrads auch der Freiheitsgrad der Verschiebung in tangentialer Richtung eingeschränkt. Die Bauteile haben an den sich berührenden Bezugsgeometrien Übermaß, wodurch Spannungen erzeugt werden.

Die Definition eines Presssitzes erfolgt auf folgende Weise:

10.2 Verbindungen zwischen zwei Teilen



Presssitzverbindung



Definition einer Presssitzverbindung

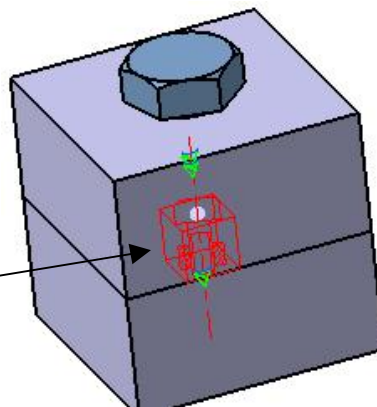
Im Eingabefenster ist beim Stützelement wiederum eine Analyseverbindung (Kontaktverbindung) oder eine Baugruppenbedingung (Flächenkontakt) zu selektieren. Dann ist das entsprechende Übermaß im Feld 'Überlappung' einzugeben.

10.2.6 Eigenschaft der Schraubenverbindung

Mit dem Befehl 'Eigenschaft der Verbindung mit Festdrehen von Bolzen' oder, besser ausgedrückt, 'Schraubenverbindung' kann eine Schraube mit einer Vorspannung definiert werden. Dabei sind mehrere Schritte zu erledigen:



Schraubenverbindung



Definition einer Schraubenverbindung mit Vorspannung

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Als Bezugsgeometrie kann eine Analyseverbindung (Kontaktverbindung von Mantelfläche der Schraube und Mantelfläche der Muttergewindebohrung) oder eine Baugruppenbedingung (Kongruenzbedingung von Achse der Schraube und Achse der Gewindebohrung oder Flächenkontakt von Mantelfläche der Schraube und Mantelfläche der Gewindebohrung) selektiert werden. Im Eingabefeld 'Festdrehstärke' ist die entsprechende Vorspannung anzugeben. Das Feld 'Ausrichtung' dient dazu, die Orientierung der Schraube (siehe schematische Darstellung im Zeichenbereich) festzulegen. Liegt der Schraubenkopf ursprünglich auf der verkehrten Seite, so ist er mit 'Gegenüber' umzudrehen.

10.3 Ferne Verbindungen

Damit können auch Verbindungen für solche Bauteile definiert werden, die in einem gewissen Abstand zueinander liegen. Die Bauteile können aber auch gemeinsame Bezugsgeometrien haben. Eine Übersicht zeigen unten stehende Icons:



Starre Verbindung



Bewegliche Verbindung



Verbindung mit virtuellem Festdrehen von Bolzen



Verbindung mit virtuellem Festdrehen von Federbolzen



Benutzerdefinierte Verbindung

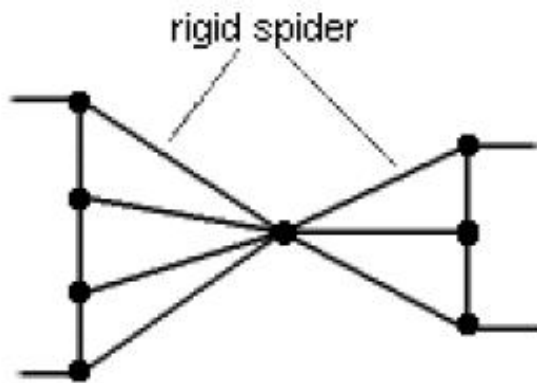
10.3.1 Starre Verbindung

Mit diesem Befehl werden die Bezugsgeometrien starr miteinander verbunden und können sich nicht verformen. Das heißt, eine Relativbewegung zwischen den Be-

10.3 Ferne Verbindungen

zugsgeometrien ist nicht möglich, es gibt keine Elastizität der Verbindungsfläche. Die starre Verbindung kann auch definiert werden, falls die Bezugsgeometrien einen Abstand zueinander haben. Damit können fehlende Bauteile nachmodelliert werden, wobei eine Kraft- und Momentenübertragung gewährleistet ist.

Die starre Verbindung wird über Rigid-Spider-Elemente vernetzt:



Vernetzung mit 'Rigid-Spider-Elementen' bei der starren Verbindung

Bei der Definition der starren Verbindung ist folgende Vorgangsweise einzuhalten:

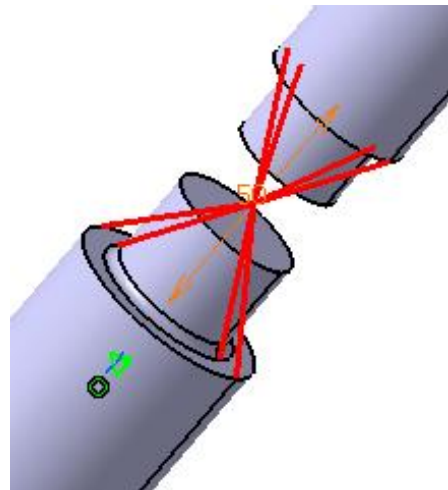


Starre Verbindung

Nach Aufruf des entsprechenden Icons erscheint ein weiteres Eingabefenster, in dem auch eine Festlegung des Koordinatensystems (globales oder benutzerdefiniertes Koordinatensystem) erfolgen kann:

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Definition einer starren Verbindung; ein fehlender Bauteil wird damit nachmodelliert



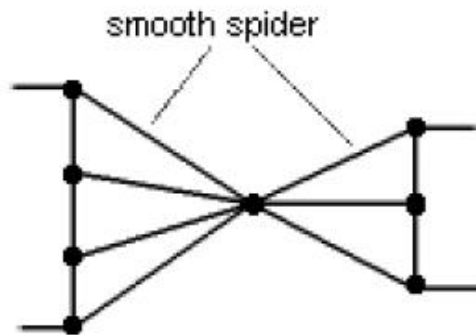
Im Eingabefenster ist als Stützelement eine Analyseverbindung (allgemeine Verbindung) oder eine Baugruppenbedingung (Kongruenzbedingung, Winkelbedingung oder Offset-Bedingung) zu selektieren. Es ist auch möglich, durch eine Auswahl der Option 'Übertragene Freiheitsgrade' die Einschränkung bestimmter Freiheitsgrade aufzuheben. Diese Freiheitsgrade können auch lokal angezeigt werden.

10.3.2 Bewegliche Verbindung

Mit diesem Icon ist es möglich, eine feste Verbindung zwischen zwei beliebig liegenden Bauteilen zu definieren, wobei die Bezugsgeometrie sich elastisch verhält. Eine Verformung der Bezugsgeometrien kann damit abgebildet werden. Mit dieser Verbindung ist es ebenfalls möglich, fehlende Bauteile nachzubilden, eine Übertragung von Kräften bzw. Momenten ist damit gewährleistet.

Die bewegliche Verbindung wird über Smooth-Spider-Elemente abgebildet:

10.3 Ferne Verbindungen

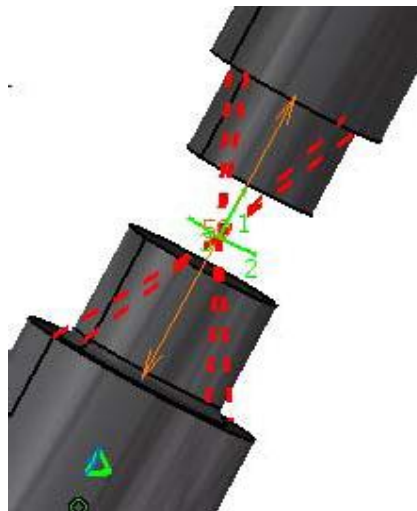
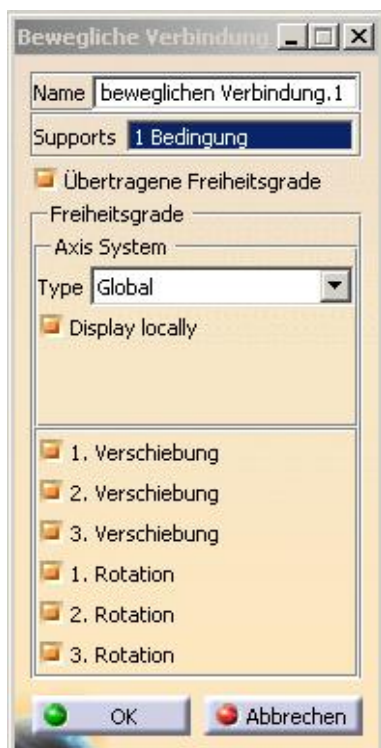


Verwendung von 'Smooth-Spider-Elementen' bei der Vernetzung der beweglichen Verbindung

Folgende Schritte sind bei der Definition einer beweglichen Verbindung erforderlich:



Bewegliche Verbindung



Definition einer beweglichen Verbindung zur Darstellung des fehlenden Bauteils

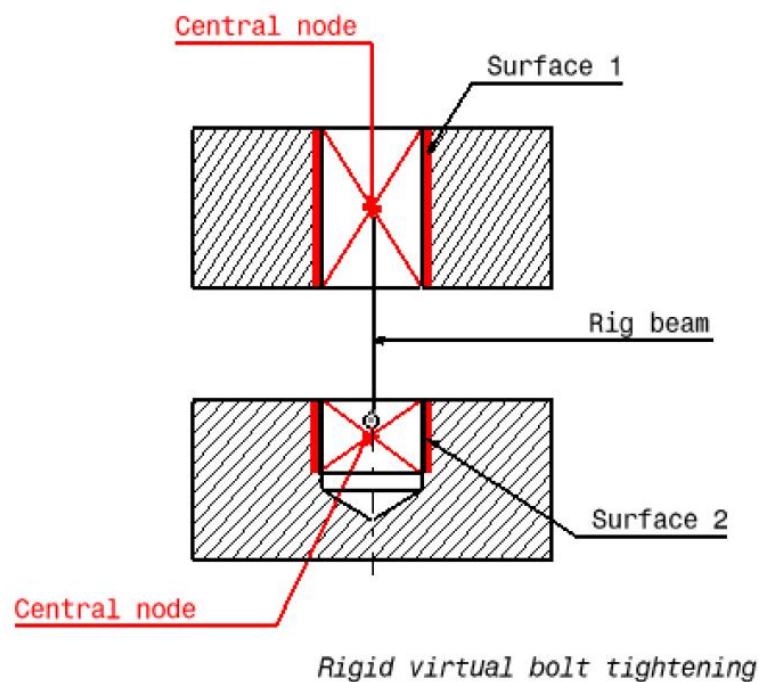
10 Baugruppenberechnung (GAS)

Für die Bezugsgeometrie kommt wieder eine allgemeine Analyseverbindung oder eine Baugruppenbedingung (Offset-, Kongruenz-, Winkelbedingung) in Frage. Weiters können auch bei der beweglichen Verbindung Freiheitsgrade definiert werden.

10.3.3 Verbindung mit virtuellem Festdrehen von Bolzen

Mit diesem Befehl kann eine virtuelle Schraubverbindung abgebildet werden. Dies ist eine Schraubverbindung ohne Darstellung der Schraubengeometrie. Die virtuelle Schraube wird dabei als unendlich steif betrachtet. Der schematische Aufbau sieht wie folgt aus:

Schematischer Aufbau einer virtuellen Schraubverbindung

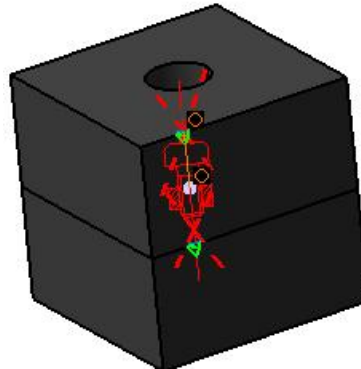


Bei der Definition dieser virtuellen Schraubverbindung sind diese Schritte abzuarbeiten:



Virtuelle Schraubverbindung

10.3 Ferne Verbindungen

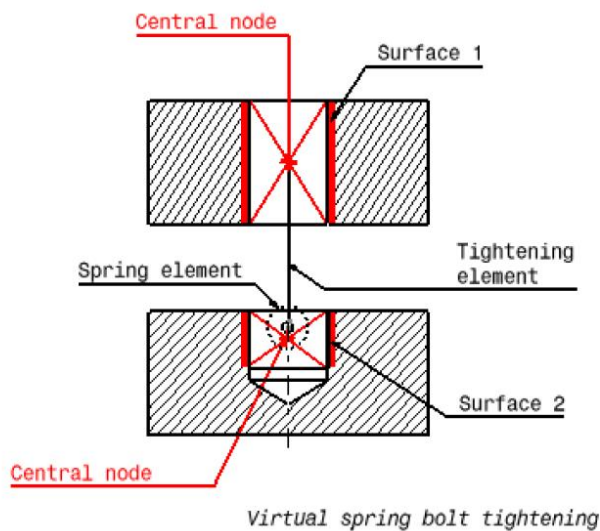


Definition einer virtuellen Schraubverbindung

Als Stützelement kann eine Analysebedingung (Mantelfläche Durchgangsbohrung und Mantelfläche Gewindebohrung) oder eine Kongruenzbedingung (Achsen der beiden Bohrungen) selektiert werden. Zusätzlich ist im Feld 'Festdrehstärke' die gewünschte Vorspannung der Schraube einzugeben.

10.3.4 Verbindung mit virtuellem Festdrehen von Federbolzen

Bei dieser Verbindungsart handelt es sich ebenfalls um eine virtuelle Schraubverbindung ohne Abbildung der Schraubengeometrie. Die Schraube wird hier allerdings nicht als unendlich steif betrachtet, sondern als elastisch. Die entsprechenden Federsteifigkeiten in translatorischer und rotatorischer Richtung werden im Eingabefenster festgelegt. Der prinzipielle Aufbau sieht folgendermaßen aus:



Prinzipieller Aufbau der virtuellen elastischen Schraubverbindung

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Zusätzlich zum Aufbau der zuvor dargestellten virtuellen Schraubverbindung wird bei der elastischen Schraubverbindung ein Federelement verwendet. Über dieses Federelement ist die Abbildung der Federsteifigkeiten durchführbar.

Die Vorgangsweise bei der Definition dieser virtuellen elastischen Schraubverbindung stellt sich wie folgt dar:



Virtuelle elastische Schraubverbindung

Definition einer
elastischen
virtuellen
Schraubverbin-
dung

Verbindung mit virtuellem Festdreh...

Name: it virtuellem Festdrehen von Federbolzen.1

Supports: 1 Verbindungsentwurf

Festdrehstärke: 2000N

Versteifung 1 der Verschiebung: $5e+006N_m$

Versteifung 2 der Verschiebung: $1e+006N_m$

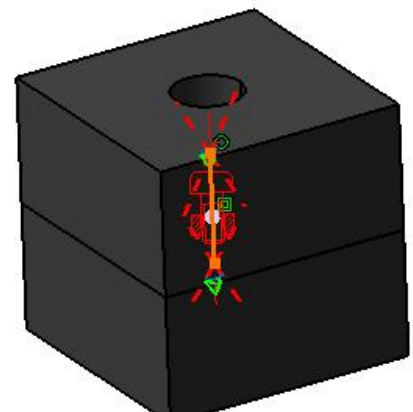
Versteifung 3 der Verschiebung: $1e+006N_m$

Versteifung 1 der Rotation: $3e+006Nxm_rad$

Versteifung 2 der Rotation: $1e+006Nxm_rad$

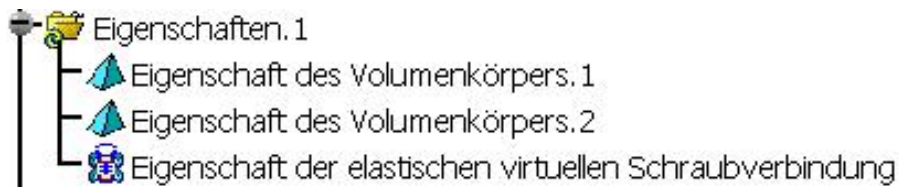
Versteifung 3 der Rotation: $1e+006Nxm_rad$

OK Abbrechen



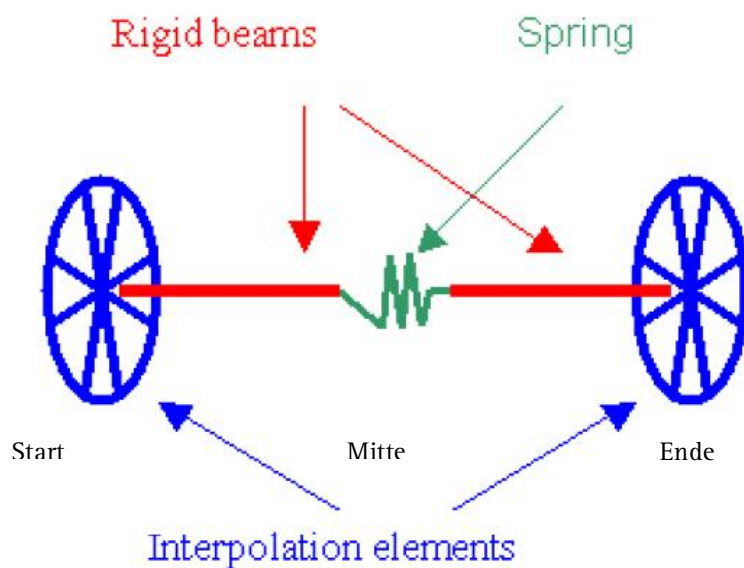
Die verwendbaren Stützelemente sind identisch mit denen bei der virtuellen Schraubverbindung. Im Feld 'Festdrehstärke' ist die Eingabe der Vorspannkraft erforderlich. In den folgenden Eingabefeldern sind die Federsteifigkeiten zu definieren.

Im Strukturbaum erfolgt nach erfolgreicher Definition, wie auch bei allen anderen Verbindungen innerhalb der Baugruppe, ein entsprechender Eintrag unter den 'Eigenschaften':



10.3.5 Benutzerdefinierte Verbindung

Damit ist es möglich, eine benutzerdefinierte Verbindung zu erzeugen. Es können die Eigenschaften für drei Elemente der Verbindung, nämlich Start, Mitte und Ende definiert werden. Der prinzipielle Aufbau dieser Verbindung sieht beispielhaft wie folgt aus:



Prinzipieller Aufbau einer benutzerdefinierten Verbindung

Dabei sind für die einzelnen Elemente folgende Bedingungen möglich:

10.3.5.1 Start

- Beweglich (Elastisch)
- Starr
- Feder beweglich
- Feder starr

10 Baugruppenberechnung (GAS)

- Kontakt starr

10.3.5.2 Mitte

Für das mittlere Element der Verbindung sind folgende Bedingungen möglich:

- Starr
- Feder Starr Feder
- Starr Feder Starr
- Feder Starr
- Starr Feder
- Träger
- Feder Träger Feder
- Träger Feder Träger
- Feder Träger
- Träger Feder
- Bolzen Starr
- Starr Bolzen
- Bolzen Träger
- Träger Bolzen
- Bolzen Starr Feder
- Feder Starr Bolzen

10.3.5.3 Ende

Für das Ende gibt es folgende Bedingungen:

- Beweglich (Elastisch)
- Starr
- Feder beweglich
- Starr Feder
- Starr Kontakt

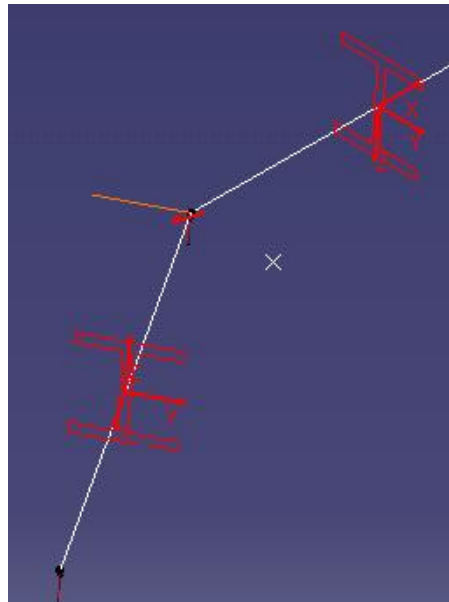
Damit kann der User seine gewünschte Verbindung konfigurieren.

10.3 Ferne Verbindungen

Eine Anwendung für diesen Verbindungstyp ergibt sich bei der Berechnung von Fachwerken. Hier müssen die einzelnen Stäbe als Parts konstruiert und später in einem Produkt zusammengebaut werden. Die Koppelung zwischen den Stäben erfolgt mit der benutzerdefinierten Verbindung:

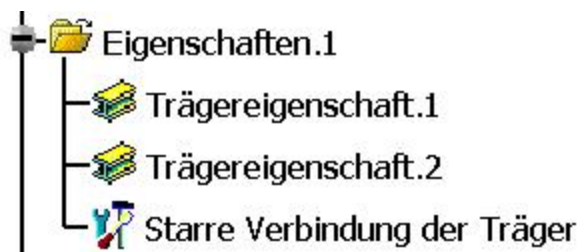


Benutzerdefinierte
Verbindung



Erzeugung einer
benutzerdefinier-
ten Verbindung

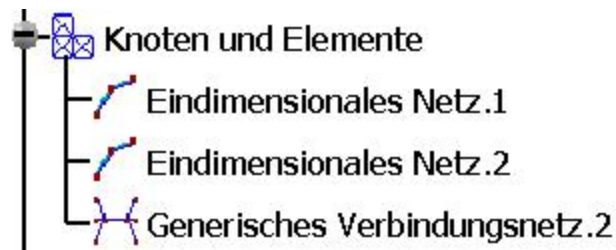
Beim Stützelement ist eine zuvor erzeugte allgemeine Verbindung zwischen den beiden Endpunkten der zu verbindenden Träger zu selektieren. Für das Element 'Mitte' ist die starre Eigenschaft zu wählen. Die Verbindung ist auch im Strukturbaum ersichtlich, ebenso das erzeugte Verbindungsnetz:



Benutzerdefinierte
Verbindung im
Strukturbaum

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Verbindungsnetz
für die benutzer-
definierte Verbin-
dung



10.4 Schweißverbindungen

Mit diesen Befehlen kann eine Schweißverbindung definiert werden. Folgende Möglichkeiten stehen zur Verfügung:



Definition eines benutzerdefinierten Materials



Punktschweißverbindung



Nahtschweißverbindung

10.4.1 Definition eines benutzerdefinierten Materials

Mit diesem Icon kann ein benutzerdefiniertes isotropes Material definiert werden. Bei der Festlegung der Materialeigenschaften ist kein geometrisches Bezugselement erforderlich. Dieser Vorgang ist vor allem bei der Analyse von Schweißverbindungen wichtig, denn damit können der Schweißverbindung selbst (Punkte oder Naht) Materialeigenschaften zugewiesen werden.

Die Erzeugung eines benutzerdefinierten Materials startet mit dem Aufruf des entsprechenden Icons:



Definition isotropes Material

10.4 Schweißverbindungen

Danach erscheint ein weiteres Eingabefenster:



Anlegen eines benutzerdefinierten isotropen Materials

In diesem sind folgende Eingaben zu tätigen:

- Young-Modulus (Elastizitätsmodul)
- Poisson-Faktor (Querkontraktionszahl)
- Dichte
- Wärmeausdehnung
- Neigungs-Modulus (Schubmodul z.B. für Stahl 81.000N/mm^2)

Danach wird das neu definierte Material im Strukturbaum angezeigt:



Eintrag des angelegten Materials im Strukturbaum

10.4.2 Die Punktschweißverbindung

Mit diesem Befehl ist es möglich, die Eigenschaft einer Punktschweißverbindung zu definieren. Dabei können für die Schweißverbindung unterschiedliche mechanische Typen festgelegt werden:

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Mechanische Eigenschaften der Punktschweißverbindung

- Spring-Rigid-Spring



- Rigid-Spring-Rigid



- Beam



- Hexahedron

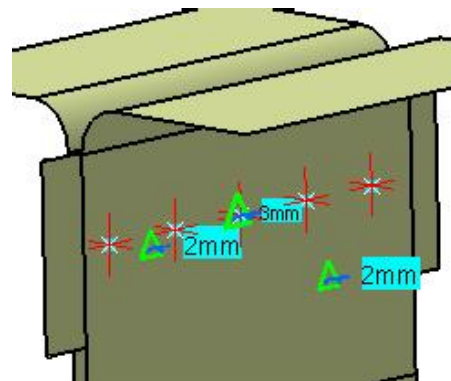


Um die Eigenschaft einer Punktschweißverbindung abzubilden, sind folgende Schritte auszuführen:



Punktschweißverbindung

Definition einer Punktschweißverbindung

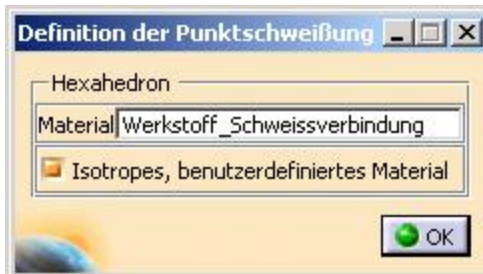


Als Stützelement ist eine zuvor definierte Analyse-Punktverbindung auszuwählen. Als mechanische Eigenschaft (Typ) wurde hier beispielhaft 'Hexahedron', das heißt Nachbildung der Schweißpunkte über Hexaeder-Elemente gewählt. Danach ist folgendes Icon im aktuellen Fenster zu selektieren:

10.4 Schweißverbindungen



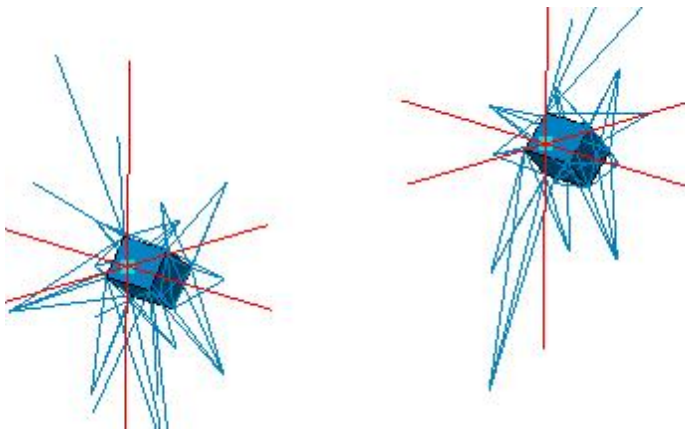
Definition der Punktschweißung



Materialzuordnung für
die Schweißpunkte

In diesem Eingabefenster ist die Option 'Isotropes, benutzerdefiniertes Material' zu aktivieren und anschließend ist im Strukturbaum der zuvor definierte Werkstoff für die Schweißverbindung zuzuordnen.

Eine Netzdarstellung der Schweißpunkte zeigt folgendes Ergebnis:



Darstellung der
Schweißpunkte mit
Hexaederelementen

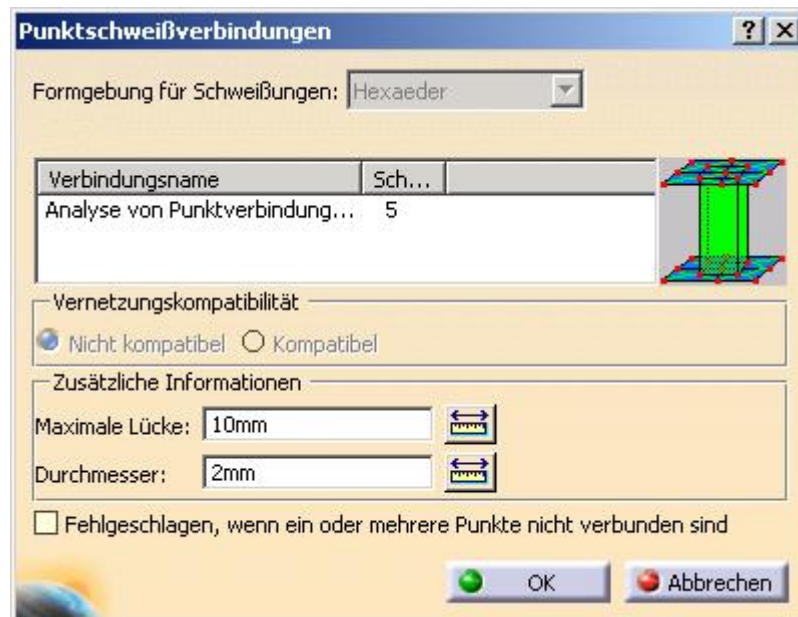
Man sieht, dass die einzelnen Schweißpunkte über Hexaeder-Elemente vernetzt wurden. Durch einen Doppelklick auf den entsprechenden Eintrag im Strukturbaum erhält man die Möglichkeit, dieses Netz zu editieren:



Verbindungsnetz mit Schweißpunkt.1

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Editieren des erzeugten
Verbindungsnetzes für
die Schweißpunkte



Nach erfolgreicher Definition erscheint im Strukturbaum die Eigenschaft der Punktschweißverbindung.

Eintrag im
Strukturbaum



Ein ausgeführtes Übungsbeispiel zur FEM-Analyse einer Punktschweißverbindung finden Sie im nächsten Kapitel. Die FEM-Berechnung von Schweißpunkten hat vor allem in der Automobilindustrie und hier speziell im Karosseriebau eine enorme Bedeutung.

10.4.3 Nahtschweißverbindung

Mit diesem Icon kann die Eigenschaft einer Schweißnahtverbindung definiert werden. Dabei gibt es auch hier unterschiedliche Typen zur Abbildung der mechanischen Eigenschaften, und zwar:

- Schalenelement
- Hexaeder
- Rigid (Starr)

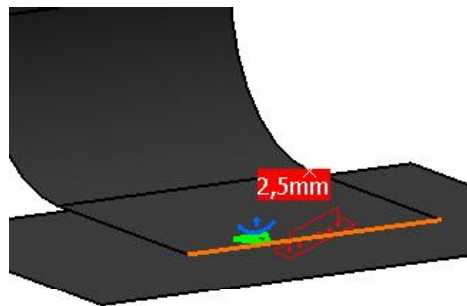
10.4 Schweißverbindungen

- Feder Starr Feder
- Starr Feder Starr
- Kontakt

Die Definition einer Nahtschweißverbindung erfordert folgende Schritte:



Nahtschweißverbindung

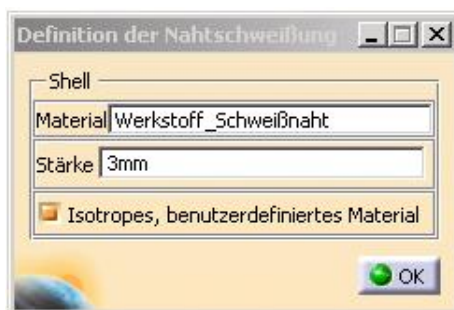


Definition einer Nahtschweißverbindung

Die Bezugsgeometrie (Support) ist eine schon zuvor definierte Analyse-Linienverbindung. Der entsprechende mechanische Typ ist zu wählen und dann das folgende Icon:



Definition der Nahtschweißung



Werkstoff_Schweißnaht

Materialzuordnung und Definition der Nahtstärke

10 Baugruppenberechnung (GAS)

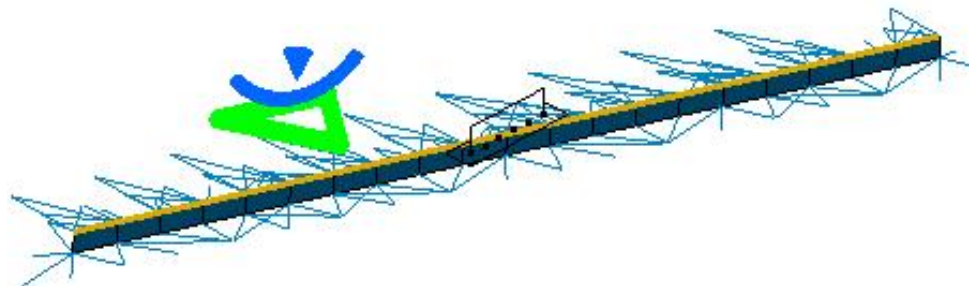
Im angezeigten Eingabefenster ist der Schweißnaht wieder der isotrope benutzerdefinierte Werkstoff zuzuordnen. Zusätzlich ist die Nahtstärke im Feld 'Stärke' einzugeben. Damit erscheint die Eigenschaft der Nahtverbindung im Strukturbaum:

Eintrag im
Strukturbaum



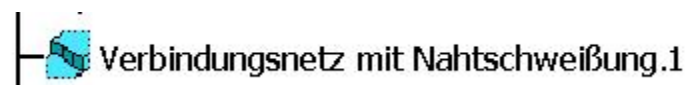
Falls gewünscht, kann nun auch eine Netzdarstellung angezeigt werden:

Netzdarstellung
der Schweißnaht
(Schalenelemente)



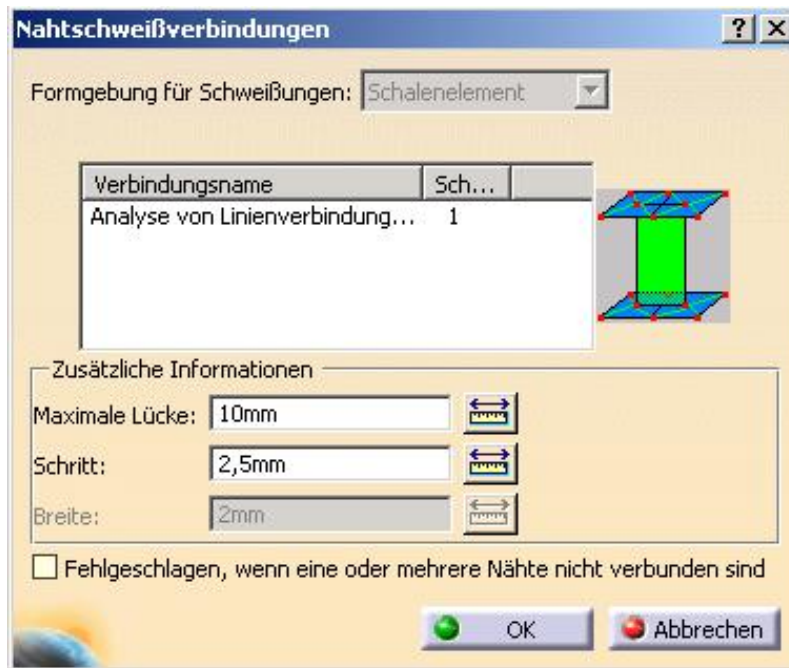
Über einen Doppelklick im Strukturbaum kann das Netz editiert und nachbearbeitet werden:

Netz editieren
über Doppelklick
im Strukturbaum



Damit erscheint ein weiteres Eingabefenster, in dem noch eine Verfeinerung des Netzes über die Parameter 'Maximale Lücke' und 'Schritt' definiert werden kann. Dazu ist allerdings ein Update des Netzes durchzuführen.

10.5 Übersicht der Baugruppenverbindungen



Parameter zur
Netzverfeinerung

Ein Übungsbeispiel zur FEM-Analyse einer Schweißnaht findet sich im nächsten Kapitel.

10.5 Übersicht der Baugruppenverbindungen

In der unten dargestellten Tabelle findet sich eine Übersicht aller in der GAS-Umgebung verfügbaren Verbindungen. Es ist für jede Verbindung angegeben, welche Baugruppenbedingung bzw. welche Analyseverbindung bei der Definition selektiert werden kann. Die Teilfläche-Teilfläche-Analyseverbindung (Kontakt) lässt sich nur in der Arbeitsumgebung 'Analysis Connection' definieren. Alle anderen Analyseverbindungen können auch in der GAS-Umgebung definiert werden.

10 Baugruppenberechnung (GAS)

Übersicht der unterschiedlichen Verbindungsarten und das selektierbare Stützelement

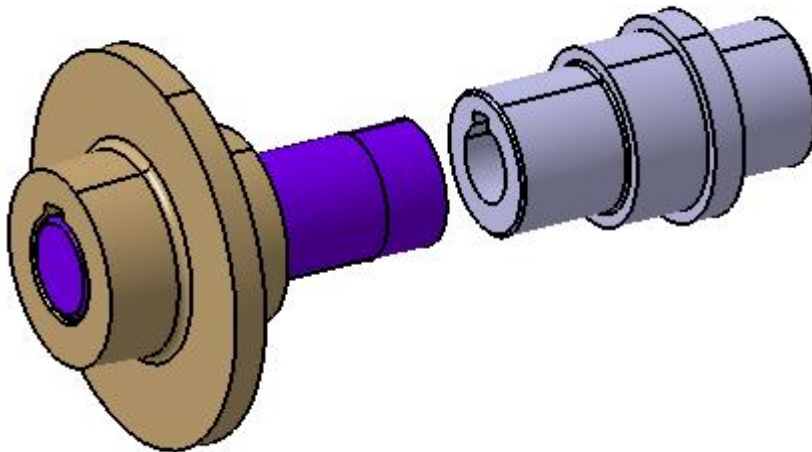
Baugruppen-Verbindung	Icon	Assembly Bedingung			Analyseverbindung	
		Kontakt	Kongruenz	Offset	Kontakt	Allgemein
Fixe						
Gleitend						
Kontakt						
Fixierte Feder						
Preßsitz						
Schraubverbindung						
Starr						
Beweglich						
Virtuelle Schraube						
Virtuelle Schraube u. Feder						
Benutzerdefiniert						
Schweißpunkt						
Schweißnaht						

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Ziel dieses Kapitels ist es, die zuvor beschriebenen Verbindungsmöglichkeiten von Bauteilen innerhalb einer Baugruppe an praktischen Beispielen zu erläutern.

11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe

In diesem Beispiel wird eine FEM-Analyse einer kleinen Baugruppe durchgeführt. Die Riemenscheibe (Nabe) wird mit einem Drehmoment von 150 Nm beaufschlagt. Dieses Drehmoment ist über eine Passfederverbindung auf die Abtriebswelle zu übertragen. Diese wiederum ist über eine starre Scheibenkupplung (dieser Teil wird in der Baugruppe nicht abgebildet und ist nachzumodellieren) mit einer Verbindungswelle gekoppelt. Die Baugruppe stellt sich wie folgt dar:



Darstellung der zu berechnenden Baugruppe

Starten Sie mit dem Laden der Datei *Welle_Nabenverbindung.CATProduct*! Die einzelnen Bauteile sind bereits in ihrer richtigen Position und die entsprechenden Baugruppenbedingungen sind vorhanden. Achten Sie bei der Vergabe der Baugruppenbedingungen bereits darauf, welche mechanischen Eigenschaften Sie bei der FEM-Analyse des Produktes benötigen. Mit den angeführten Flächenkontaktbedingungen können in weiterer Folge die Eigenschaften der mechanischen Verbindungen definiert werden:

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Baugruppenbedingungen zur späteren Definition der mechanischen Eigenschaften für die FEM-Berechnung

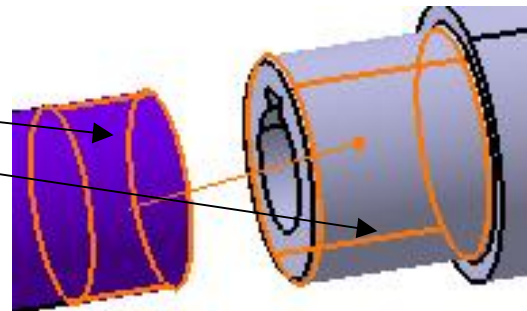
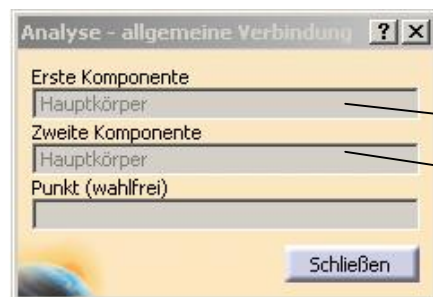
- Flächenkontakt.8 (Abtriebswelle,Passfeder.1)
- Flächenkontakt.9 (Passfeder.1,Abtriebswelle)
- Flächenkontakt.10 (Abtriebswelle,Passfeder.1)
- Flächenkontakt_Abstützung (Abtriebswelle,Nabe.1)
- Flächenkontakt.12 (Passfeder.1,Abtriebswelle)
- Flächenkontakt.13 (Nabe.1,Passfeder.1)
- Flächenkontakt.14 (Passfeder.1,Nabe.1)
- Flächenkontakt_zylindrisch (Abtriebswelle,Nabe.1)

In dieser Datei wurden jedoch auch sämtliche Analyseverbindungen definiert, die ebenfalls zur Abbildung der Eigenschaften der mechanischen Verbindungen innerhalb der Baugruppe dienen können. Dies führen Sie am besten in der Arbeitsumgebung 'Analysis Connection' durch. Es gibt natürlich auch mechanische Verbindungen, die nicht über eine entsprechende Baugruppenbedingung definiert werden können. Dies ist auch bei der Analyseverbindung 'Allgemeine_Verbindung_Scheibekupplung' der Fall. Die Vorgangsweise bei der Definition ist folgende:



Entwurf einer allgemeinen Analyseverbindung

Definition einer allgemeinen Analyseverbindung zur Nachmodellierung der fehlenden Scheibekupplung



Wählen Sie bei 'Erste Komponente' die dargestellte Mantelfläche der Abtriebswelle und bei 'Zweite Komponente' die vordere Mantelfläche der Verbindungswelle. Vergeben Sie anschließend auch einen entsprechenden Namen für diese Analyseverbindung, um sie später leichter im Strukturbaum zu finden:

11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe

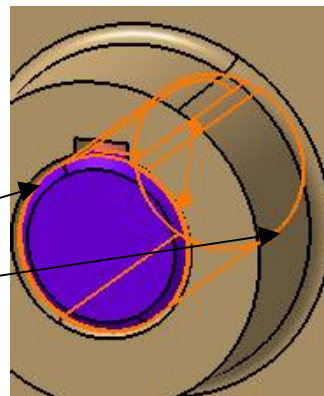


Vergabe eines entsprechenden Namens

Im Weiteren ist beispielhaft auch die Definition der Teilfläche-Teilfläche-Analyseverbindung von Abtriebswelle und Nabe dargestellt:



Verbindung Teilfläche-Teilfläche



Definition einer Analyseverbindung mit Flächenkontakt

Bei dieser Analyseverbindung sind die Mantelflächen der Nabe sowie der Abtriebswelle zu selektieren und danach die erzeugte Verbindung umzubenennen:



Analyseverbindungen.3

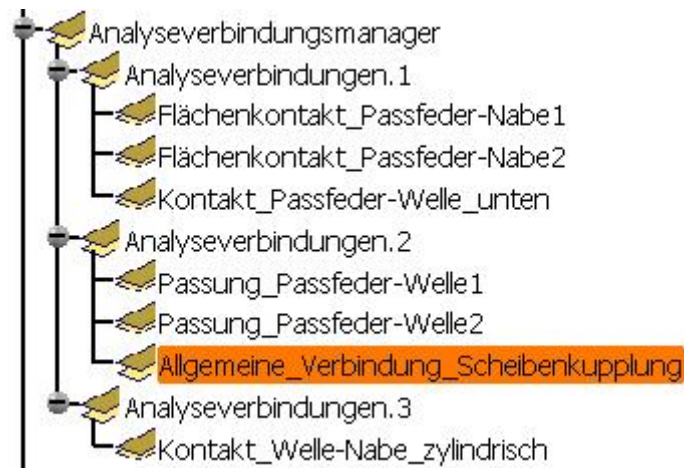
Kontakt_Welle-Nabe_zyindrisch

Eintrag der Analyseverbindung im Strukturbaum

Sie finden im Strukturbaum unter dem Eintrag 'Analyseverbindungsmanager' alle zur Definition der mechanischen Eigenschaften benötigten Analyseverbindungen. Es ist wie schon erwähnt nicht unbedingt notwendig, alle diese Analyseverbindungen zu erzeugen, da auch die Baugruppenbedingungen verwendet werden können. Die einzige Analyseverbindung, die unbedingt zusätzlich zu den Baugruppenbedingungen definiert werden muss, ist die Analyseverbindung 'Allgemeine_Verbindung_Scheibenkupplung':

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Sämtliche erzeugte Analyseverbindungen zur Definition der Bauteilverbindungen



Versuchen Sie selbst, durch Löschen der Analyseverbindungen bzw. der Baugruppenbedingungen Ihre Übungsdatei auf diesen Stand zu bringen. Sie sollten dazu Ihre Übungsdatei zuvor unter einem anderen Namen abspeichern.

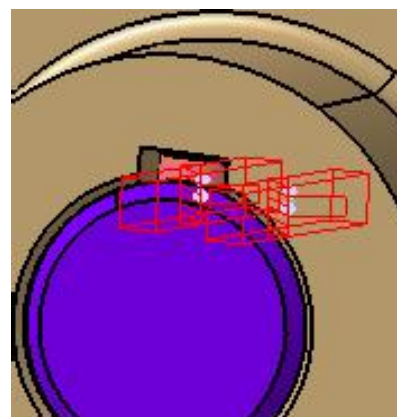
Nachdem bereits jedem Bauteil ein Material mit entsprechenden mechanischen Eigenschaften zugeordnet ist, kann die GAS-Arbeitsumgebung gestartet werden. Wählen Sie eine Statikanalyse zur Ausführung.

Nun beginnen Sie damit, die mechanischen Eigenschaften der Bauteilverbindungen zu definieren. Als Erstes wird der feste Sitz der Passfeder in der Abtriebswelle festgelegt:

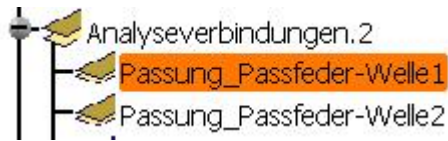
Fester Sitz der Passfeder in der Welle über die fixierte Verbindung



Fixierte Verbindung

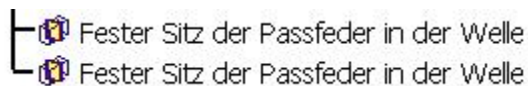


11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe



Auswahl des Stützelements
im Strukturbaum
(Analyseverbindung)

Die geeignete Analyseverbindung wählen Sie im Strukturbaum. Dieser Vorgang erfolgt für die beiden seitlichen ebenen Flächen der Passfeder. Damit erhalten Sie folgenden Eintrag unter 'Eigenschaften':



Eintrag der Eigenschaft
der Verbindung im
Strukturbaum

Diese fixe Verbindung bildet den leichten Presssitz der Passfeder in der Welle ab, berücksichtigt allerdings nicht das Übermaß der Pressverbindung (dies wäre durch die Definition der Eigenschaft einer Presspassverbindung möglich), was aber keinen Einfluss auf die kritischen Spannungen hat.

Die dritte Fläche, die mit einer fixierten Verbindung zu versehen ist, ist die untere Begrenzungsfläche der Passfeder:



Fixierte Verbindung

Flächenkontakt.8 (Abtriebswelle,Passfeder.1)



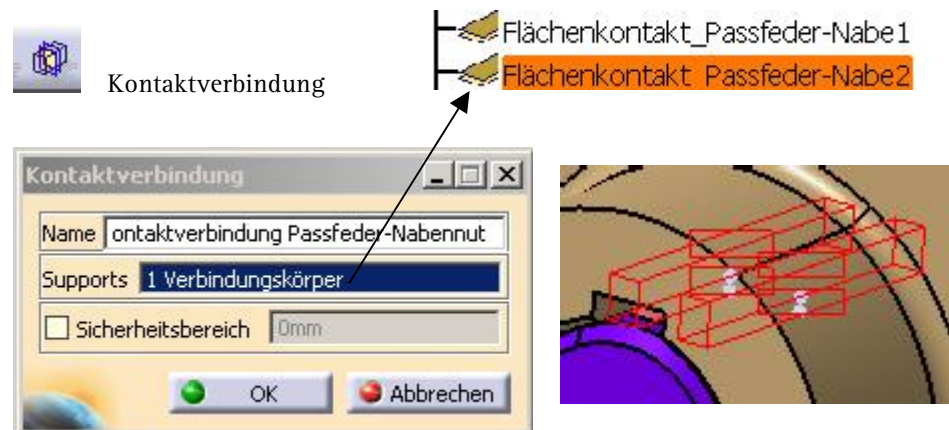
Definition einer weiteren
fixierten Verbindung

In diesem Fall wird als Stützelement eine Baugruppenbedingung, nämlich der Flächenkontakt zwischen der unteren Fläche der Passfeder und der unteren Fläche in der Wellennut, selektiert. Das Ergebnis ist das gleiche.

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Definieren Sie als Nächstes die Eigenschaft der Kontaktbedingung für die Passfeder in der Nabennut. Diese Kontaktbedingung ist erforderlich, um Kräfte übertragen zu können, und daraus resultiert eine Flächenpressung. Gehen Sie folgendermaßen vor:

Definition von zwei Kontaktverbindungen für Passfeder-Nabennut



Als Support können Sie die dargestellte Analyseverbindung oder die entsprechende Kontaktverbindung der Baugruppe selektieren. Der Sicherheitsbereich wird mit 0 mm festgelegt, das heißt, die Teile haben bereits Kontakt.

Damit erhalten Sie im Strukturbaum folgenden Eintrag unter 'Eigenschaften':

Eintrag der Eigenschaft der Kontaktverbindung im Strukturbaum

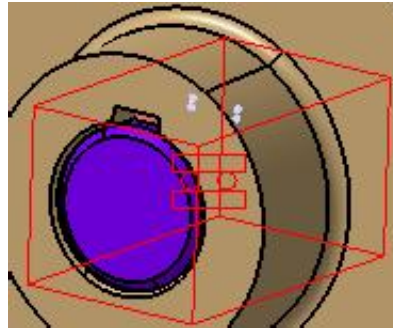


Im nächsten Schritt definieren Sie eine Gleitbedingung zwischen der Abtriebswelle und der Nabe. Damit wird die kinematische Relation zwischen den beiden Teilen berücksichtigt:



Gleitverbindung

11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe



Definition einer Gleitverbindung zwischen Antriebswelle und Nabe

Als geometrisches Bezugselement wählen Sie die entsprechende Analyseverbindung, womit auch im Strukturbaum ein Eintrag erscheint:

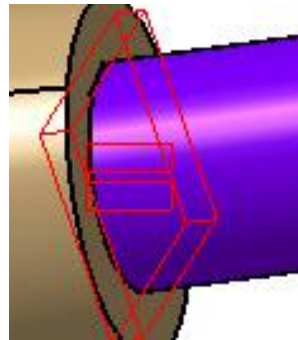


Eintrag der Gleitverbindung im Strukturbaum

Eine weitere Kontaktverbindung besteht zwischen der Nabe und dem Absatz der Abtriebswelle, der diese gegen axiales Verschieben sichert:



Flächenkontakt_Abstützung (Abtriebswelle,Nabe,1)



Definition einer Kontaktbedingung, um die axiale Verschiebung zu sperren

Als Stützelement wird hier eine entsprechende Kontaktbedingung gewählt, der Sicherheitsbereich wird auf 0 mm belassen. Damit ergibt sich ein weiterer Eintrag im Strukturbaum:



11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Nun definieren Sie noch eine bewegliche Verbindung zwischen der Abtriebswelle und der Verbindungswelle. Damit können Sie die fehlende Scheibenkupplung nachmodellieren, und eine Übertragung des Drehmomentes ist gewährleistet:

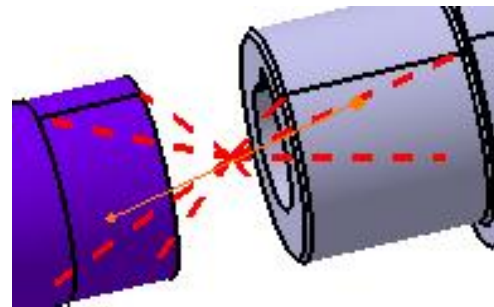


Bewegliche Verbindung

Definition einer beweglichen Verbindung zur Übertragung des Drehmomentes



Allgemeine Verbindung Scheibenkupplung



Als Supportelement selektieren Sie die dargestellte allgemeine Analyseverbindung, die Freiheitsgrade bleiben alle gesperrt. Damit ergibt sich folgender Strukturbaumeintrag:



Beweglichen Verbindung Scheibenkupplung

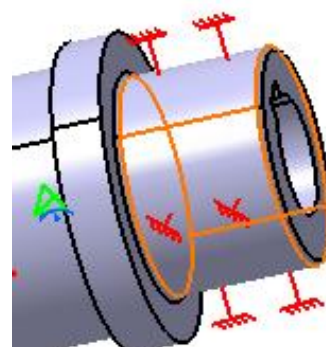
Mit dieser Verbindung sind alle mechanischen Randbedingungen innerhalb der Baugruppe festgelegt. Nun sind noch die Randbedingungen nach außen zu definieren.

Zuerst vergeben Sie eine feste Einspannung für die hintere Mantelfläche der Verbindungswelle:



Feste Einspannung

Feste Einspannung der Verbindungswelle

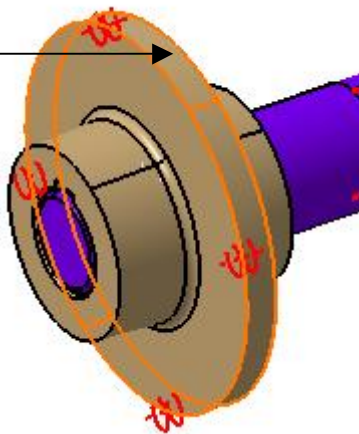
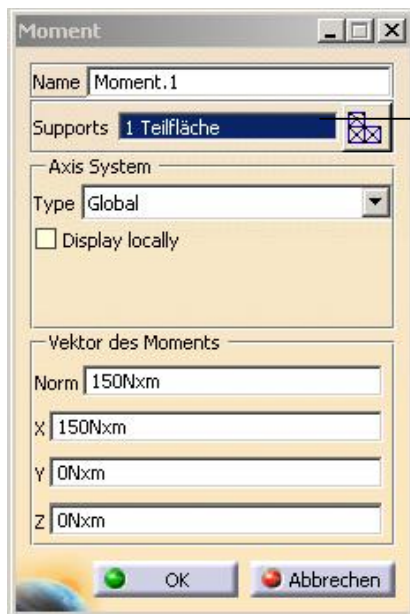


11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe

Im letzten Schritt ist das Drehmoment von 150 Nm, das über die Nabe eingeleitet wird, zu definieren:



Moment



Lasteinleitung über die Nabe (Drehmoment 150 Nm)

Die Bezugsgeometrie ist die Mantelfläche, auf welcher der Riemen läuft. Im globalen Koordinatensystem ist ein Drehmoment von 150 Nm um die X-Achse einzugeben.

Die Randbedingungen können Sie mit der Datei *'Wellen_Naben-verbindung_fem.CATAnalysis'* überprüfen.

Nun kann eine erste Berechnung der Baugruppe mit linearen Tetraeder-Elementen erfolgen. Dabei wird eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse durchgeführt, und die Randbedingungen können kontrolliert werden. Stimmt die qualitative Spannungsverteilung mit der Realität überein, sollte im nächsten Schritt eine Netzverfeinerung auf parabolische Elemente durchgeführt werden.

Kontrollieren Sie vor dem Starten der Faktorisierung in jedem Fall die benötigten Systemressourcen, da diese bei der FEM-Analyse einer Baugruppe mit TE10-Elementen bereits sehr beträchtlich sind. Es kann durchaus sein, dass je nach Hardware die Berechnungszeit bis zu einer Stunde beträgt. Bei den nun erhaltenen Er-

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

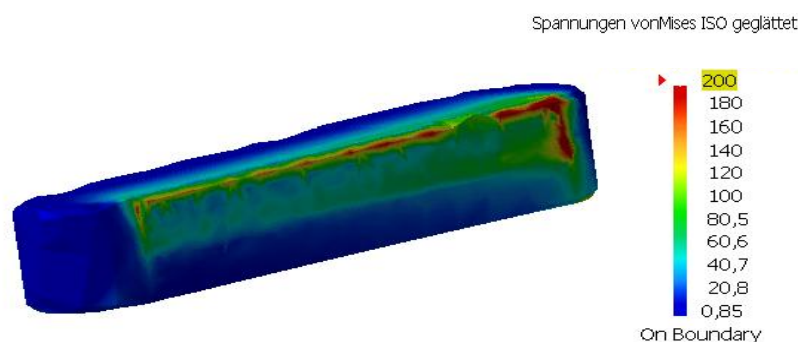
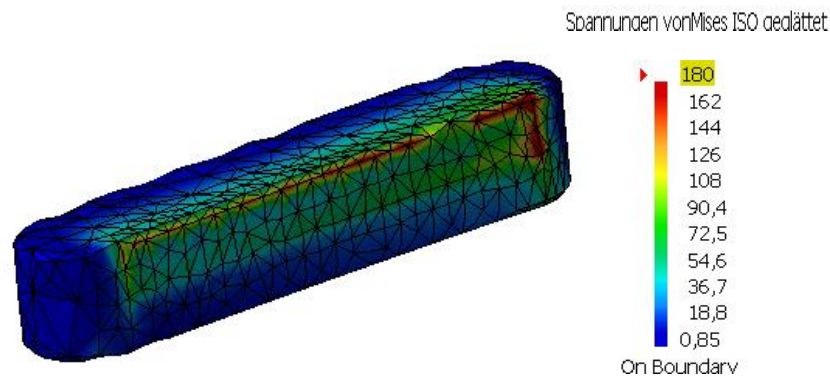
gebnissen sollten Sie, um eine quantitative Spannungsaussage treffen zu können, den globalen objektiven Fehler über eine Adaptivität überprüfen. Dieser globale Fehler sollte unter 10 % liegen. Ansonsten ist eine Spannungsaussage für den betreffenden Bauteil nicht zulässig.

In kritischen Spannungsbereichen (z.B. für die Ermittlung der Flächenpressung der Passfeder) ist es notwendig, eine neue globale bzw. lokale Adaptivitätseinheit für das jeweilige Netz zu definieren.

Die erneute Berechnung ist dann allerdings sehr ressourcenaufwändig. Damit sollten nur für die kritischen Spannungsbereiche lokale Adaptivitäten (hier allerdings mit einem lokalen Fehler < 5%) definiert werden.

Eine Auswertung der Ergebnisse zeigen die folgenden Darstellungen:

Flächenpressung der
Passfeder mit und ohne
Netzdarstellung
(globaler Fehler <20%)



11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe

Die Auswertung einzelner Teile der Baugruppe erhält man über einen Doppelklick auf die VonMises-Vergleichsspannungen im Strukturbaum und anschließenden Aufruf der Kartei 'Selections':



Auswahlliste der darstellbaren Netze

Damit erscheint eine Auswahlliste der zur Auswertung verfügbaren Netze der Bauteile. Man kann entweder nur ein einzelnes Bauteil oder aber auch mehrere Bauteile gleichzeitig selektieren.

Die angeführten Ergebnisse wurden mit einer globalen Adaptivitätseinheit, bei welcher der objektive Fehler ca. 10 % betrug, berechnet:



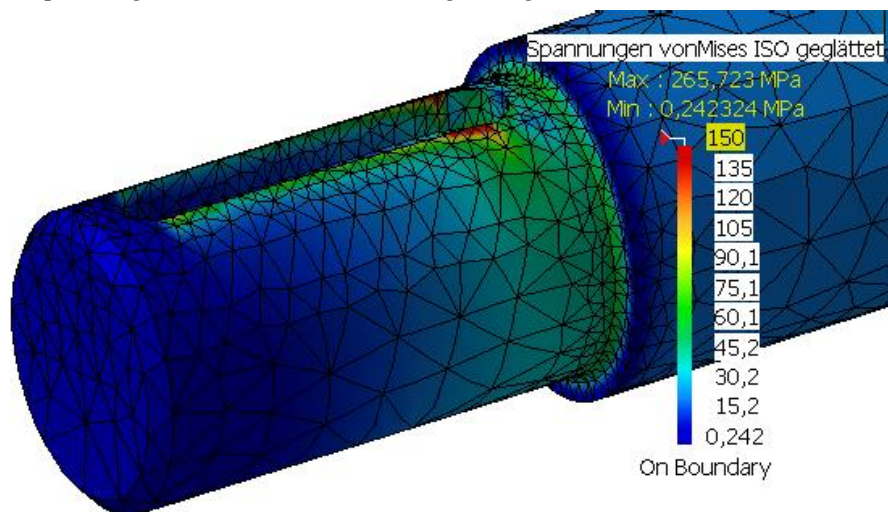
Festlegung einer neuen Adaptivität mit einem objektiven Fehler von ca. 10%

Eine weitere Verbesserung des lokalen Fehlers wäre für eine quantitativ verlässliche Spannungsaussage (lokaler Fehler sollte < 5% sein) zwar notwendig, erfordert aber eine entsprechend teure Hardware und wurde in diesem Fall nicht durchgeführt.

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Die Spannungen in der Abtriebswelle zeigen folgenden Verlauf:

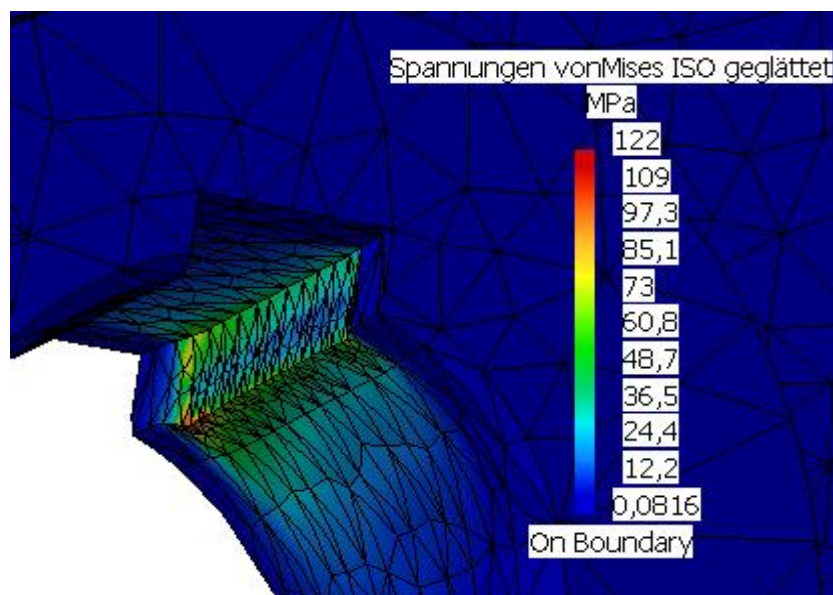
Vergleichsspannungen
in der Wellennut



Hier treten die höchsten Spannungen im Bereich der Passfedernut auf.

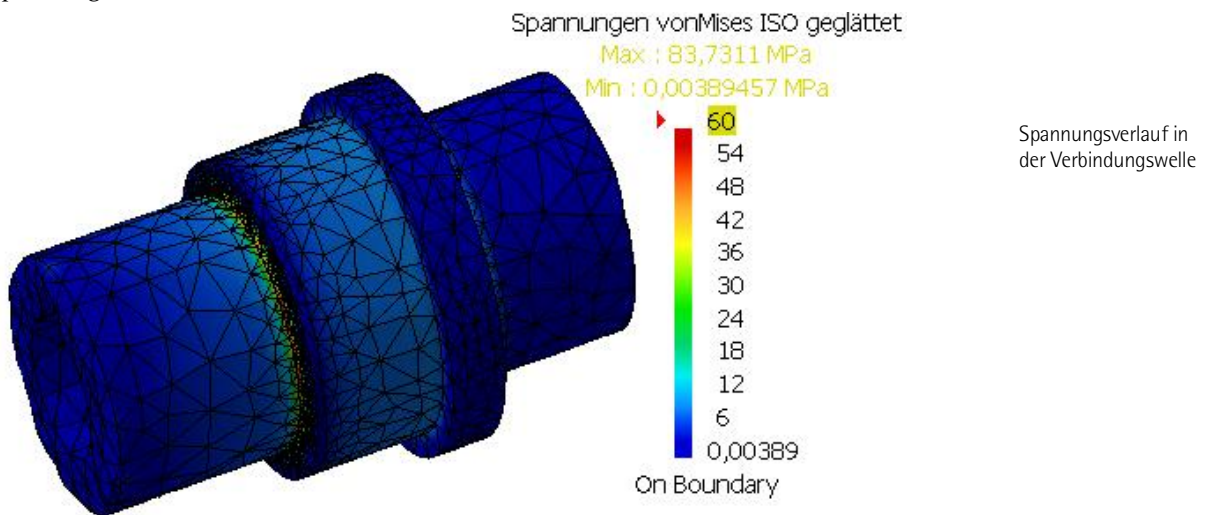
Die Spannungen im Bereich der Nabennut zeigen einen analogen Verlauf:

Vergleichsspannungen
in der Nabennut

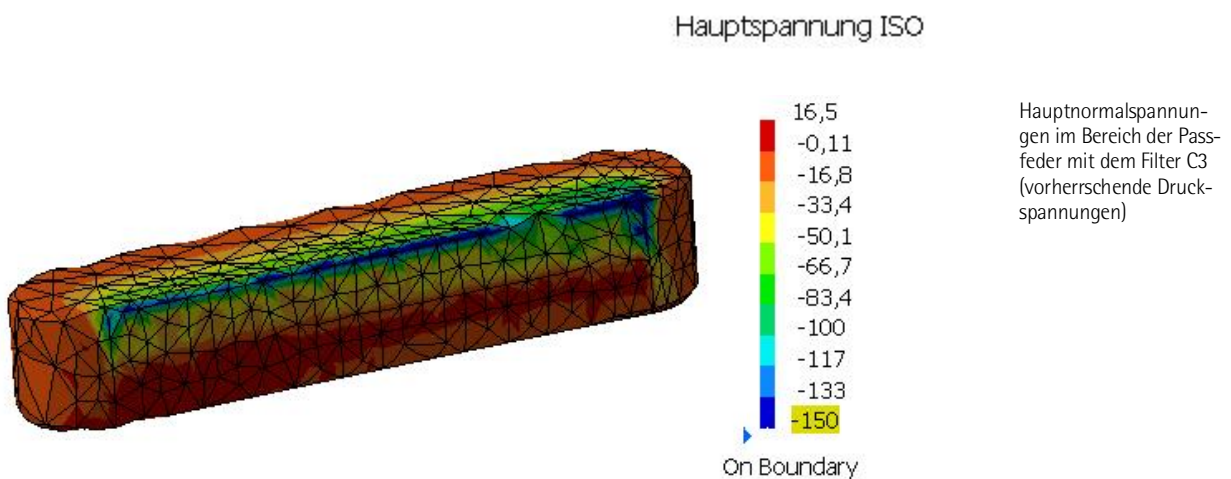


11.1 Abtriebswelle mit Riemenscheibe

Weiters erhält man für die Verbindungswelle folgende Darstellung der Vergleichsspannungen:



Interessant ist auch eine Analyse der Hauptnormalspannungen, die hier mit dem Filter C3 (vorherrschende Druckspannungen) ausgewertet wurden:

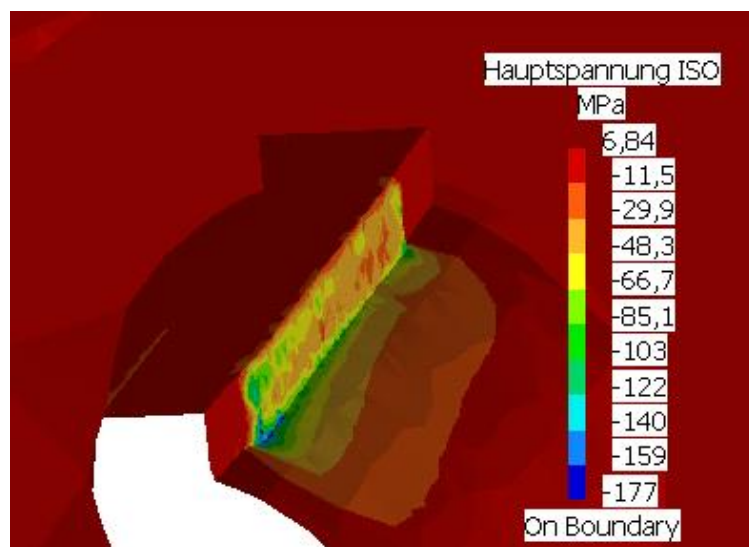


Es ist ersichtlich, dass die auftretenden kritischen Spannungen im Bereich der Passfeder Druckspannungen (Flächenpressung) in der Höhe von ca. 150 N/mm² sind.

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

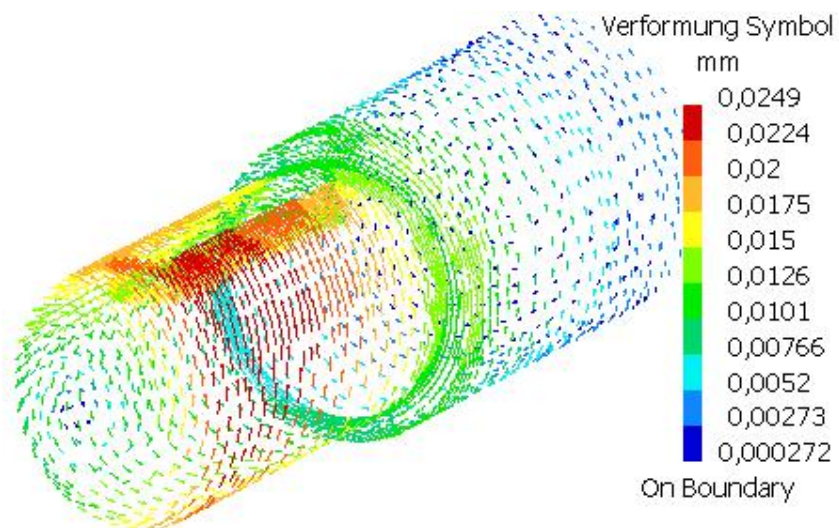
Die gleiche Auswertung (vorherrschende Druckspannungen) wurde auch für die Nabennut vorgenommen:

Vorherrschende
Druckspannungen
im Bereich der
Nabennut



Eine Auswertung der Verformungen für die Abtriebswelle zeigt folgendes Bild:

Auftretende Verfor-
mungen im Bereich
der Abtriebswelle

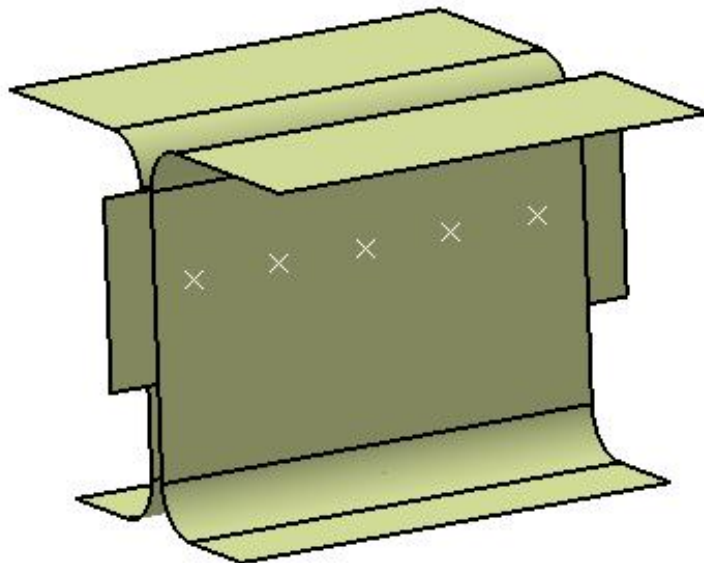


11.2 Punktschweißverbindung

In diesem Beispiel soll eine Punktschweißverbindung, wie sie im Maschinenbau und Stahlbau häufig vorkommt, untersucht werden. Die Baugruppe besteht aus drei Blechprofilen, die über fünf Schweißpunkte miteinander verbunden werden. Es handelt sich um eine Flächenkonstruktion, wie bei dünnwandigen Bauteilen meist üblich. Die einzelnen Bleche sollen mit Schalenelementen vernetzt werden.

Die mittlere Platte wird durch eine Zugkraft von 600 N beansprucht, die seitlichen Bleche sind an der unteren Fläche fix eingespannt (verschraubt). Die mittlere Platte hat eine Dicke von 3 mm und die beiden seitlichen Bleche eine Wandstärke von 2 mm.

Öffnen Sie die Datei '*Punktschweißverbindung.CATProduct*'. Die Baugruppe hat folgendes Aussehen:



Baugruppe zur Analyse
einer Punktschweißver-
bindung

Da es sich um eine Flächenkonstruktion handelt, ist es wichtig, jene Flächen, die mit Schalenelementen vernetzt werden sollen, als externe Ansicht zu definieren. Dies wird beispielhaft an einem seitlichen Blech demonstriert. Starten Sie die Arbeitsumgebung 'Flächenkonstruktion' durch einen Doppelklick auf den Bauteilnamen im Strukturbaum:

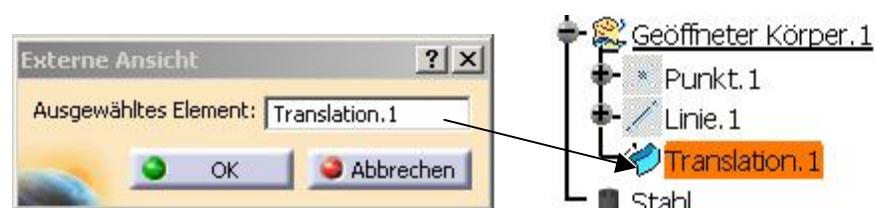
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Starten der Arbeitsumgebung 'Flächenerzeugung' über einen Doppelklick im Strukturbaum



Damit erhalten Sie die Icons zur Flächenerzeugung. Dort gehen Sie auf 'Tools' und wählen 'Externe Ansicht':

Definition einer externen Ansicht



Selektieren Sie im Strukturbaum die Translationsfläche als ausgewähltes Element. Damit wird diese Fläche für die Schalenvernetzung erkannt.

Auf die gleiche Weise definieren Sie eine externe Ansicht für die Fläche 'Füllen.1' der mittleren Platte.

Beachten Sie auch, dass die Schweißpunkte in einem geöffneten Körper über eine Definition ihrer Koordinaten konstruiert wurden. Verwenden Sie in diesem Fall niemals eine Skizze!

Schweißpunkte in einem geöffneten Körper



Nachdem bereits für alle Bauteile ein entsprechendes Material zugewiesen wurde, kann die GAS-Arbeitsumgebung gestartet werden.

Zuerst ist es nun notwendig, die Wandstärken für die Bleche zu definieren. Dies geschieht mit einem Doppelklick auf den entsprechenden Parameter im Zeichenbereich oder im Strukturbaum:

11.2 Punktschweißverbindung



Eigenschaft des Schalelements. 1

Aufruf der Eigenschaft des Schalelements (standardmäßige Wandstärke 1mm)

Im folgenden Eingabefenster ist die gewünschte Wandstärke zu spezifizieren:



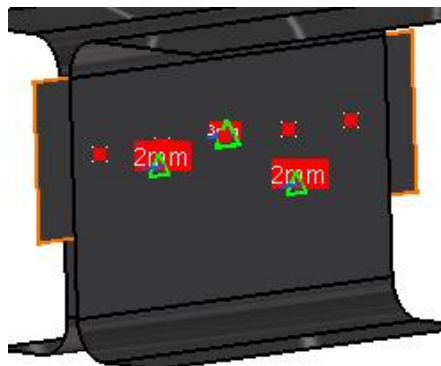
Zuordnung der gewünschten Wandstärke

Über eine Datenzuordnung könnte auch eine veränderliche Wandstärke (speziell bei Tiefziehteilen notwendig) eingegeben werden.

Der nächste Schritt ist die Definition der Analyseverbindung für eine Punktschweißung:



Analyse Punktschweißverb.

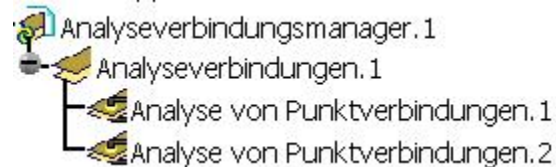


Definition einer Analyseverbindung für eine Punktschweißung

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Im Eingabefenster sind die beiden Bleche nacheinander zu selektieren, und im Feld 'Punkte' ist der geöffnete Körper, der die Schweißpunkte beinhaltet, zu wählen. Diese Vorgangsweise ist sowohl für das linke als auch für das rechte Blechprofil durchzuführen, worauf man folgenden Eintrag im Strukturbaum erhält:

Eintrag der
Analyseverbindungen
im Strukturbaum

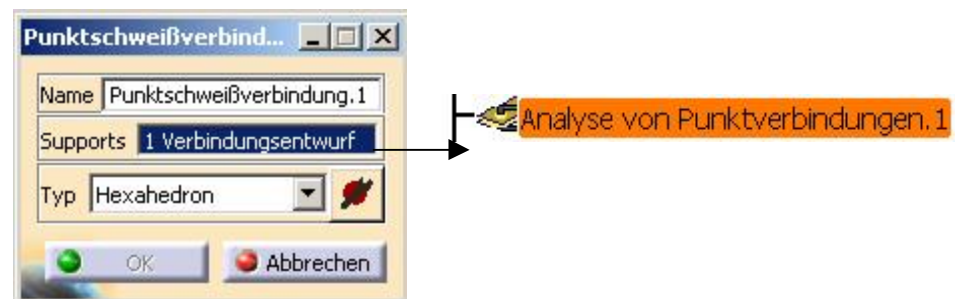


Nun ist noch eine Definition der Eigenschaft der Punktschweißverbindung durchzuführen:

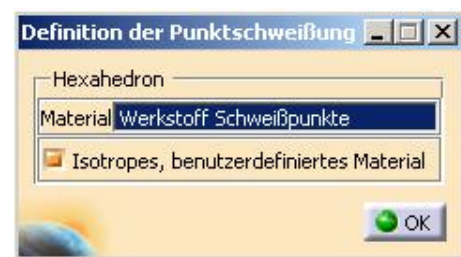


Eigenschaft Punktschweißverbindung

Definition der Eigen-
schaft der Punkt-
schweißverbindung



Beim Feld 'Typ' ist ein Hexaeder-Element zur Abbildung der Schweißpunkte zu wählen. Daraufhin wählen Sie das Icon:



11.2 Punktschweißverbindung

Ordnen Sie in dem dann folgenden Eingabefenster den zuvor mit dem Icon



Benutzerdefiniertes isotropes Material

Benutzerdefinier-
tes isotropes
Material

erzeugten Werkstoff für die Schweißpunkte zu. Die Eigenschaft der Punktschweißverbindung wird auch im Strukturbaum angezeigt:



Eintrag der Punkt-
schweißverbindung
im Strukturbaum

Damit ist die Definition der Randbedingungen innerhalb der Baugruppe erledigt. Im nächsten Schritt werden die Randbedingungen nach außen und die Last aufgebracht. Die beiden Profilbleche werden an den unteren ebenen Flächen als fix eingespannt betrachtet:



Feste Einspannung



Definition einer festen
Einspannung für die
beiden unteren ebenen
Flächen

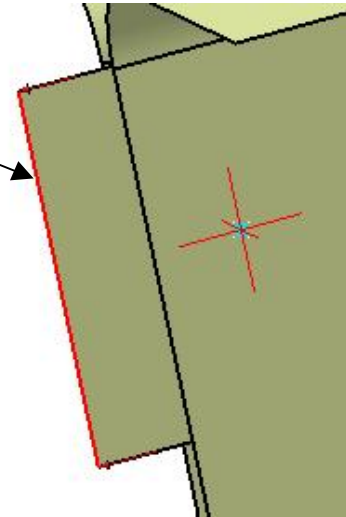
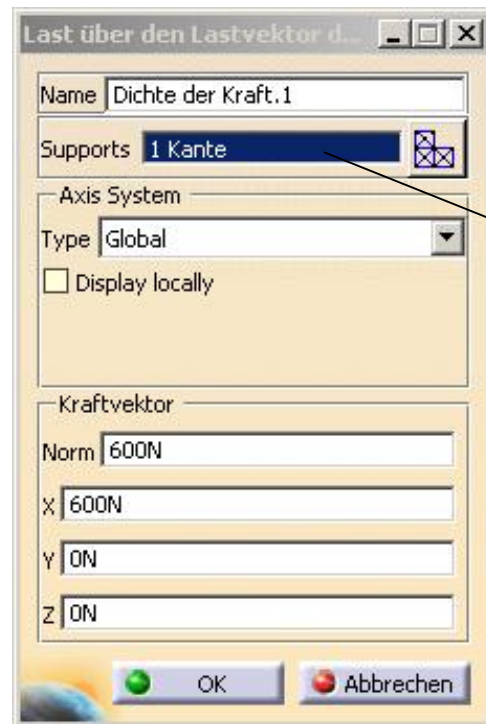
Die Last wird auf die vordere Kante der rechteckigen mittleren Platte mit dem Befehl 'Dichte der Kraft' in der Höhe von 600 N aufgebracht:



Dichte der Kraft

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Definition der Belastung
mit 600 N im globalen
Koordinatensystem

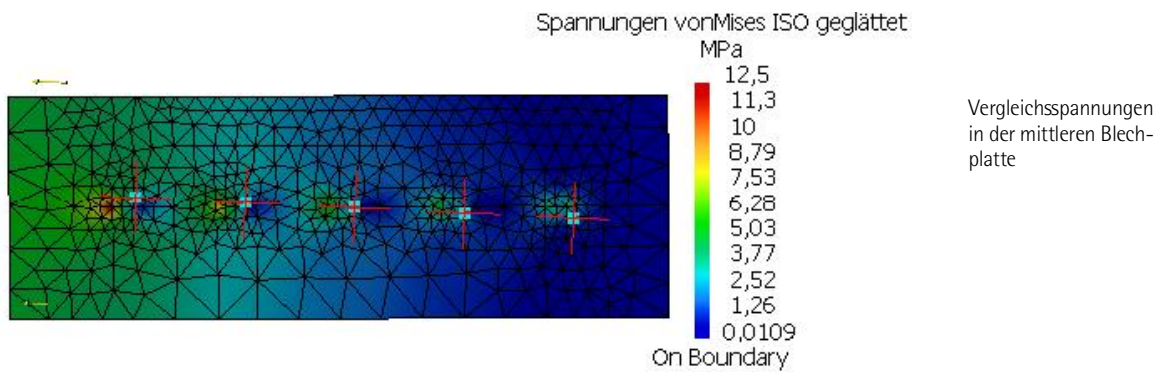


Damit ist die Definition der Randbedingungen beendet, und Sie können das Ergebnis mit der Datei *'Punktschweißverbindung.CATAnalysis'* vergleichen.

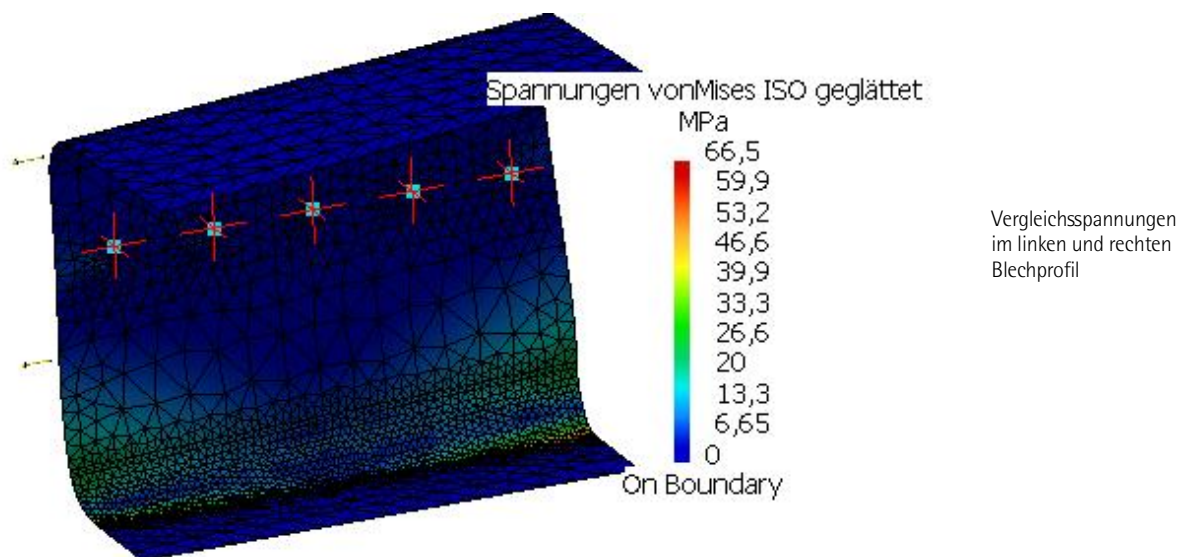
Die Berechnung wird nun zuerst mit linearen dreieckigen Schalenelementen durchgeführt, um die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen. Danach ist eine Netzverfeinerung mit parabolischen Schalenelementen durchzuführen und der globale Fehler zu überprüfen. Der zulässige globale Fehler wurde mit 5% definiert. Eine Auswertung dieser FEM-Berechnung, mit der auch eine quantitative Spannungsaussage möglich ist, sehen Sie in den unten dargestellten Abbildungen.

Im ersten Bild ist der Verlauf der Vergleichsspannungen für die mittlere Blechplatte ersichtlich:

11.2 Punktschweißverbindung



Man sieht deutlich die erhöhten Spannungen im Bereich der Schweißpunkte.
Im nächsten Bild sind die VonMises-Spannungen für die seitlichen Blechprofile er-
sichtlich:

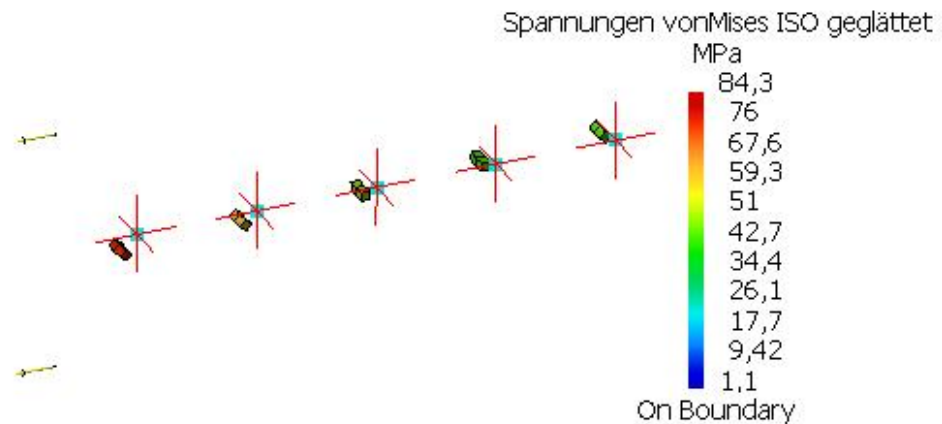


Hier treten die höchsten Spannungen im Übergang zur unteren ebenen Fläche auf.
Diese Spannungen sind wesentlich höher als bei der mittleren Platte, was sich aus
der dünneren Wandstärke ergibt.

Die Schweißpunkte selbst zeigen folgenden Spannungsverlauf:

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

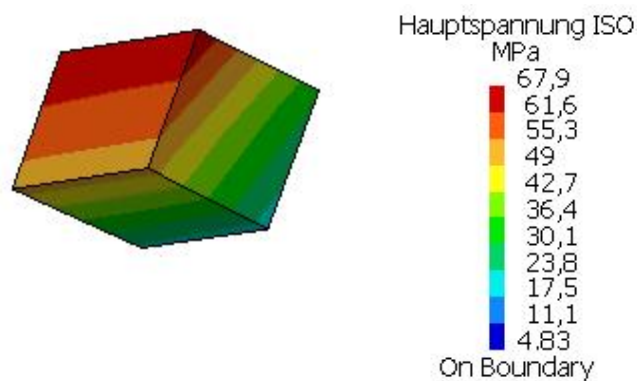
Darstellung der Vergleichsspannungen für die einzelnen Schweißpunkte



Man sieht deutlich, dass der erste linke in unmittelbarer Nähe zur Krafteinleitung liegende Schweißpunkt am stärksten belastet ist.

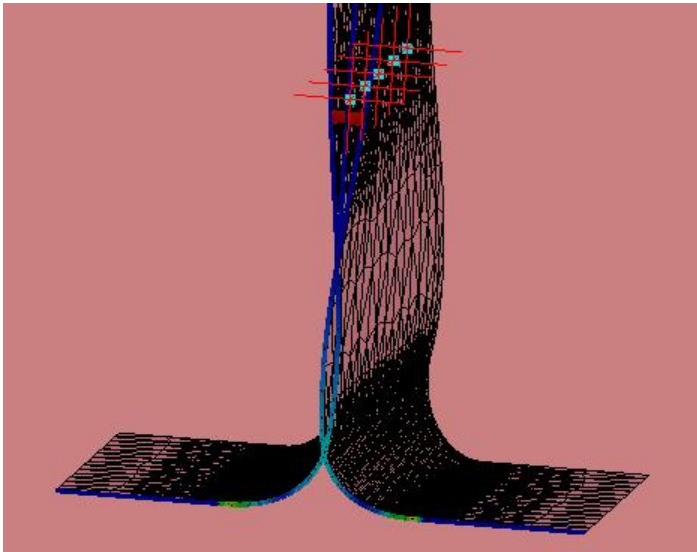
Eine Analyse der Hauptnormalspannungen (mit Filter C1 vorwiegende Zugspannungen) zeigt die Spannungsverteilung innerhalb des Knotens, der als Hexaeder-Element modelliert wurde:

Hauptnormalspannungen für den ersten Schweißpunkt (Filter C1)



In einer weiteren Darstellung sieht man die Vergleichsspannungen bei einem Schnitt durch die Baugruppe. Dieser Schnitt befindet sich auf Höhe des ersten Schweißpunktes:

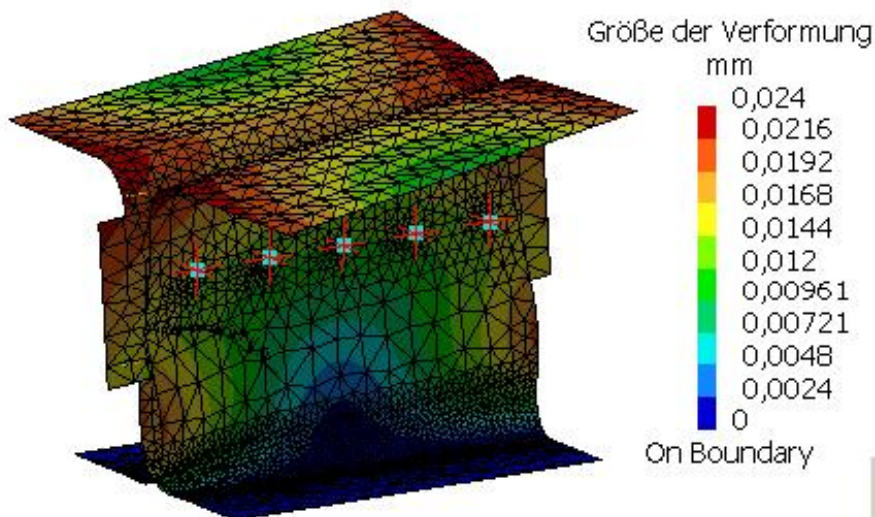
11.2 Punktschweißverbindung



Schnittdarstellung der gesamten Baugruppe im Bereich des ersten Schweißpunktes

Auch hier ist ersichtlich, dass die größten auftretenden Spannungen im Bereich des ersten Schweißpunktes auftreten.

Abschließend sind in der unteren Abbildung die Verformungen der gesamten Baugruppe zu sehen. Die Maximalwerte liegen im Bereich von 20 μm .



Darstellung der auftretenden Verformungen

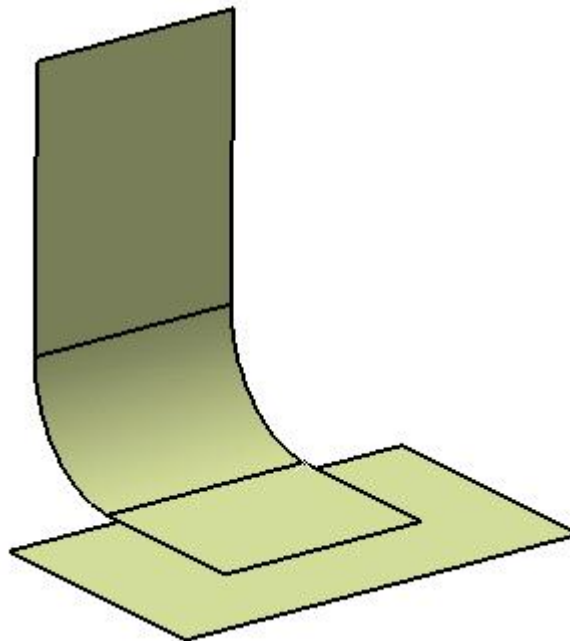
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

11.3 Schweißnahtverbindung

Bei dieser einfachen Baugruppe soll eine FEM-Analyse für eine Schweißnaht erfolgen. Die beiden Blechteile, nämlich das Grundblech und die Blechlasche, sind durch eine Schweißnaht miteinander verbunden. Die Grundplatte hat eine Wandstärke von 2,5 mm und die Blechlasche eine Stärke von 2 mm. Da es sich wieder um dünnwandige Bauteile handelt, ist eine Vernetzung mit Schalenelementen (TR6S) durchzuführen. Die Blechlasche wird mit einer verteilten Flächenlast von 200 N beaufschlagt.

Starten Sie das Übungsbeispiel mit dem Öffnen der Datei '*Schweißnahtverbindung.CATProduct*'. Die Baugruppe hat folgendes Aussehen:

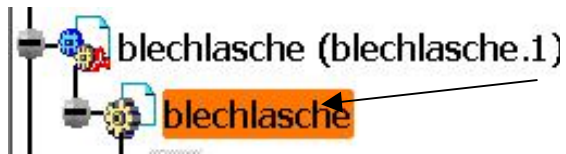
Baugruppe zur Berechnung einer Schweißnaht



Sie müssen in einem ersten Schritt beide Bauteile für eine Schalenvernetzung vorbereiten. Dies geschieht wiederum in der Arbeitsumgebung 'Flächenkonstruktion', in der die Bleche auch konstruiert wurden. Springen Sie direkt aus der Produktumgebung in diesen Arbeitsbereich und definieren Sie für beide Bauteile eine entsprechende externe Ansicht.

Beispielhaft ist dies für die Blechlasche dargestellt:

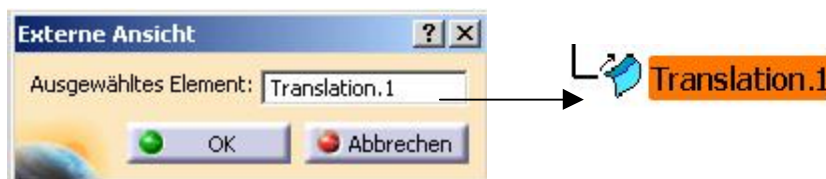
11.3 Schweißnahtverbindung



Doppelklick auf den entsprechenden Eintrag im Strukturbaum

Umschalten in die Arbeitsumgebung 'Flächenkonstruktion'

In der Arbeitsumgebung 'Flächenkonstruktion' rufen Sie über 'Tools' die externe Ansicht auf und selektieren die gewünschte zu vernetzende Fläche:

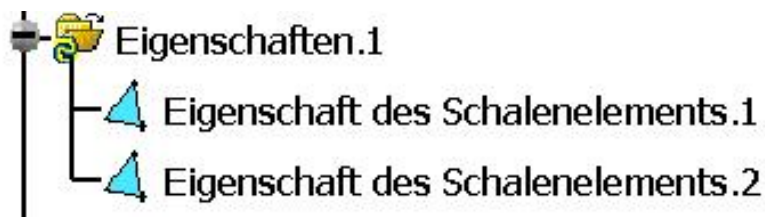


Definition einer externen Ansicht, um eine Schalenvernetzung zu ermöglichen

Dies müssen Sie auch für das Grundblech durchführen.

Nachdem der Werkstoff für das Blech bereits definiert ist, können Sie die GAS-Arbeitsumgebung starten. Es soll eine Statikanalyse durchgeführt werden.

Definieren Sie zuerst die entsprechenden Wandstärken für die Bleche:



Aufruf der Eigenschaft des Schalenelements

Durch einen Doppelklick auf die gewünschte Eigenschaft erhalten Sie ein weiteres Eingabefenster, wo Sie die standardmäßig gesetzte Wandstärke von 1 mm auf den gewünschten Wert ändern können:

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Definition der
gewünschten
Blechstärke



Dies ist beispielhaft für das Grundblech (2,5 mm) dargestellt. Für die Blechlasche vergeben Sie eine Wandstärke von 2 mm.

Als nächsten Schritt führen Sie eine Definition eines benutzerdefinierten isotropen Materials durch:



Isotropes benutzerdefiniertes Material

Definition der Mate-
rialeigenschaften der
Schweißnaht



Darauf folgt die Definition der entsprechenden Analyseverbindung:

11.3 Schweißnahtverbindung



Entwurf einer Linienverbindung



Definition der Analyse-
verbindung für die
Schweißnaht

Selektieren Sie zuerst die beiden Bleche und dann die vordere Kante der Blechlasche als Bezug für die Schweißnaht.

Nun ist noch die mechanische Eigenschaft der Schweißnaht zu definieren:



Nahtschweißverbindung



Definition der mechani-
schen Eigenschaften für
die Schweißnaht

Das Stützelement ist die zuvor definierte Analyseverbindung. Wählen Sie bei 'Typ' das Schalenelement und selektieren Sie dann das danebenstehende Icon. Nun können Sie die Nahtstärke eingeben und das bereits definierte Material für die Schweißnaht vergeben. Damit sind die Randbedingungen innerhalb der Baugruppe korrekt zugeordnet.

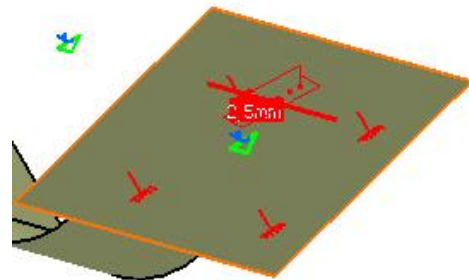
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Das Grundblech kann als fix eingespannt betrachtet werden:

Definition einer festen Einspannung für das Grundblech



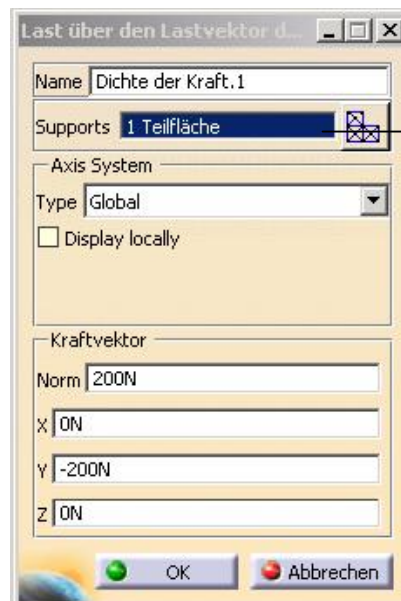
Feste Einspannung



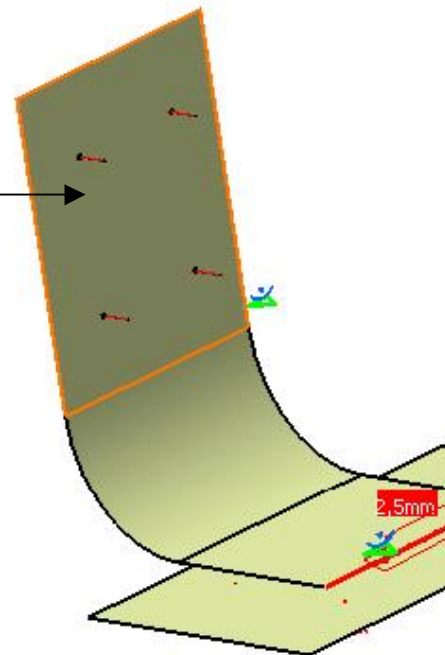
Die Blechlasche wird mit einer auf die vertikale Fläche verteilten Last von 200 N beansprucht:



Dichte der Kraft

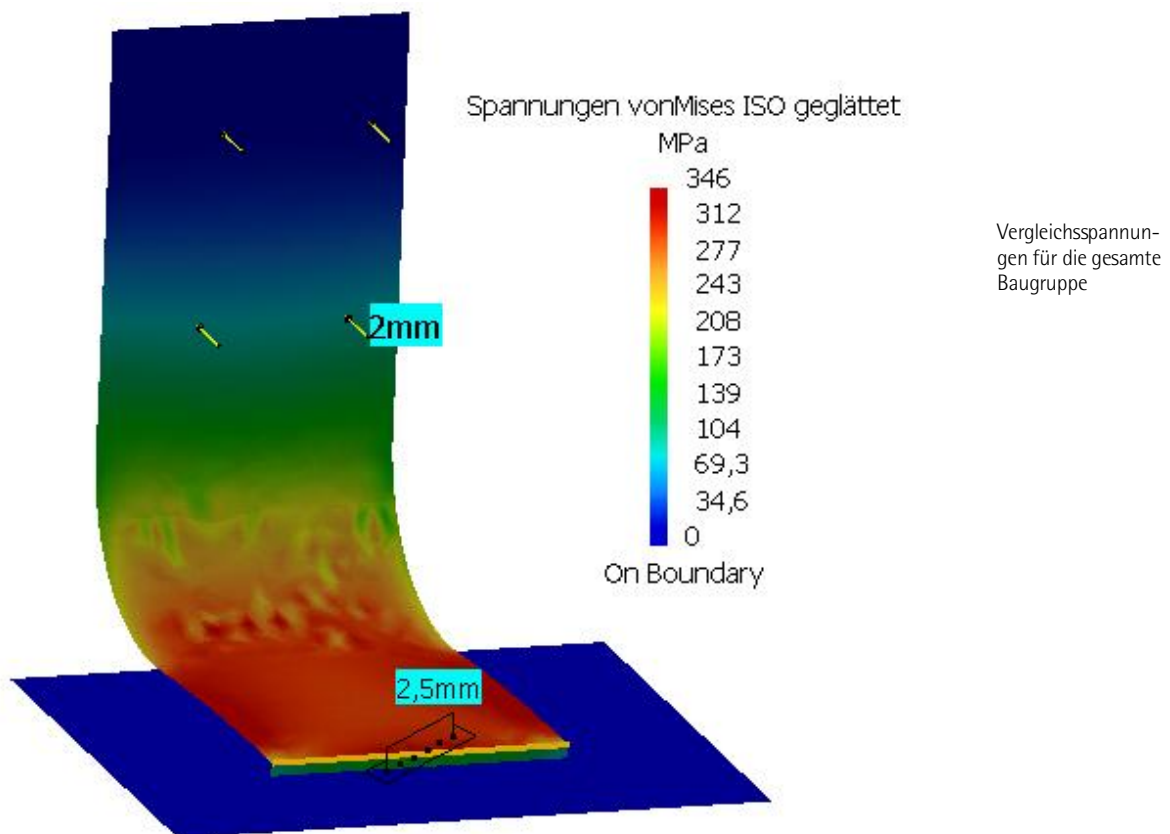


Definition einer verteilten Flächenbelastung für die vertikale Fläche der Blechlasche



11.3 Schweißnahtverbindung

Sie können zur Kontrolle der Randbedingungen die Datei '*Schweißnaht_fem.CATAnalysis*' öffnen und vergleichen. Führen Sie nun eine erste Berechnung durch und überprüfen Sie die erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich der Spannungsverteilung. Bei der anschließenden Netzverfeinerung definieren Sie ein parabolisches Schalennetz (TR6S) und eine Adaptivität mit einem globalen Fehler $< 5\%$. Die Ergebnisse dieser Berechnung stellen sich wie folgt dar:

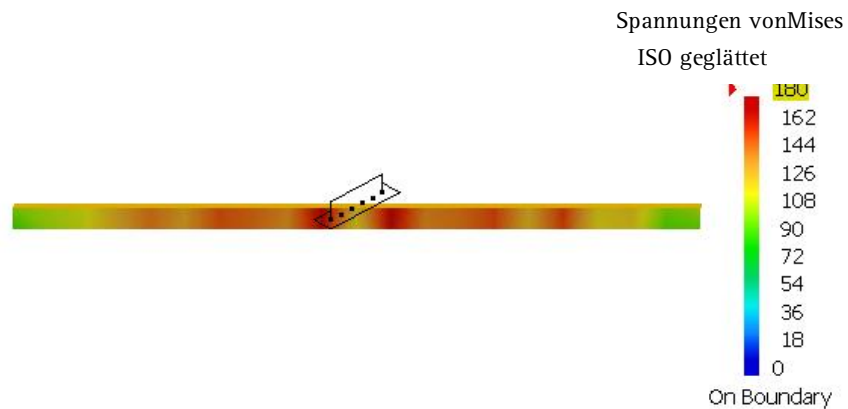


Die ermittelten Vergleichsspannungen der Baugruppe zeigen den oben angeführten Verlauf. Man sieht, dass die Schweißnaht selbst sehr stark (mit bis zu 346 N/mm^2) belastet ist.

Den Spannungsverlauf in der Schweißnaht zeigt die nächste Auswertung:

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

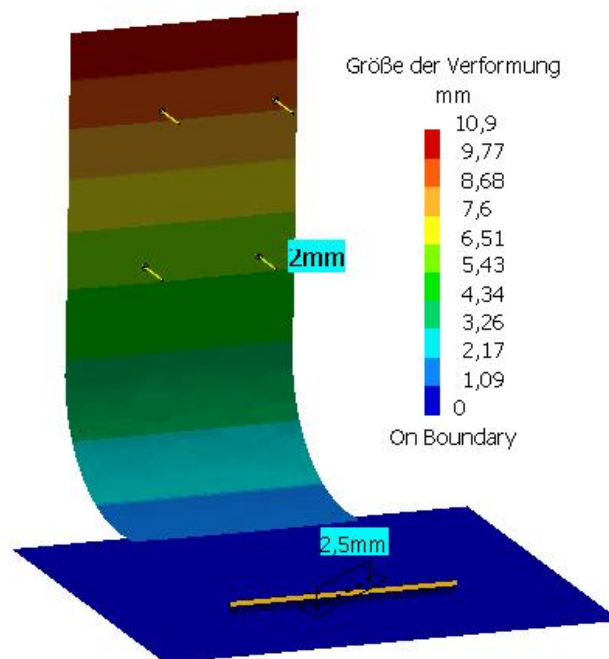
Errechnete Vergleichs-
spannungen für die
Schweißnaht



Eine Analyse der Hauptnormalspannungen ergibt einen beinahe identischen Verlauf und zeigt, dass die auftretenden Spannungen bei dieser Belastung der Schweißnaht reine Zugspannungen sind und maximal 170 N/mm^2 betragen.

Abschließend wurden noch die Verformungen der gesamten Baugruppe ausgewertet:

Verlauf der
Verformungen für
die gesamte
Baugruppe

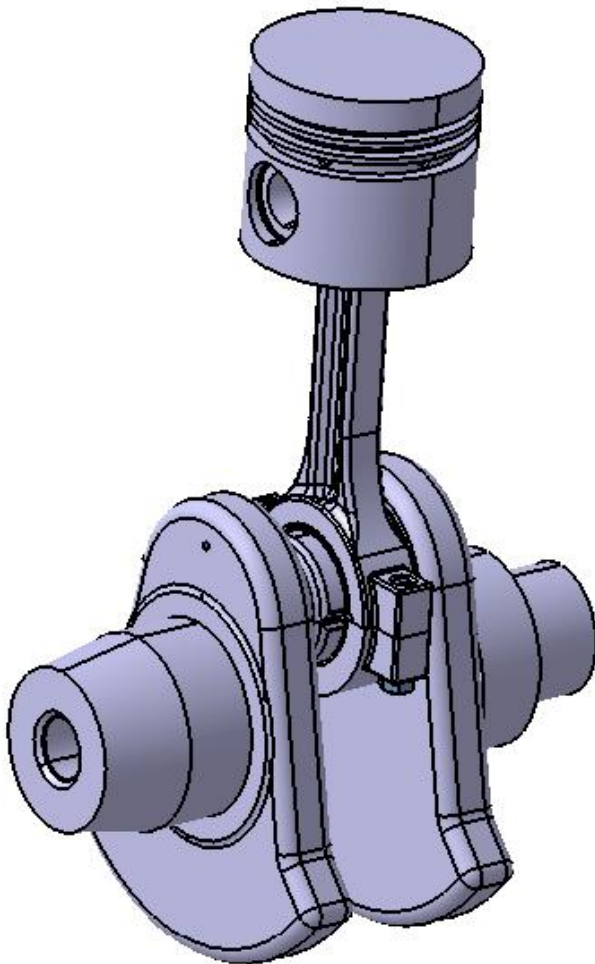


Die größten Verformungen liegen im Bereich von immerhin $10,9 \text{ mm}$.

11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

In diesem abschließenden Beispiel wird eine FEM-Analyse eines Kurbeltriebs durchgeführt. Dieser Kurbeltrieb eines V-Motors (Rasenmäher) wird mit einem Spitzendruck von 45 bar bei der Verbrennung belastet. Die Baugruppe besteht aus der Kurbelwelle, dem Pleuel, den Lagerschalen für das Gleitlager des Pleuels, dem Pleuelbolzen, dem Pleuelbolzen, dem Pleuelbolzen und zwei Sechskantschrauben, um die beiden Pleuelteile zu verbinden. Da es sich um komplexe 3D-Geometrien handelt, ist ein Netz mit Tetraeder-Elementen zu verwenden. Die Baugruppe hat folgendes Aussehen:



Kurbeltrieb eines
V-Motors für die
FEM-Analyse

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Starten Sie das Übungsbeispiel, in dem Sie die Datei *'Kurbeltrieb_V_motor_fem_start.CATProduct'* öffnen. Da es sich größtenteils um importierte Daten über die 'STEP'-Schnittstelle handelt, ist im Strukturbaum der einzelnen Bauteile meist nur der entsprechende Volumskörper ersichtlich. Die CATIA-GPS-Arbeitsumgebung kann prinzipiell von jedem anderen 3D-CAD-System die Daten importieren und mit diesen Daten problemlos FEM-Analysen durchführen.

Da für alle Bauteile bereits ein entsprechender Werkstoff definiert ist und alle Teile mit Tetraeder-Elementen vernetzt werden sollen, kann die GAS-Arbeitsumgebung gestartet werden. Wählen Sie zur Durchführung der Berechnung eine Statikanalyse.

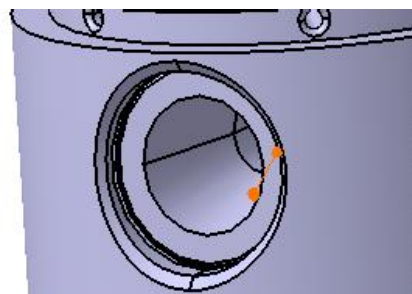
Im ersten Schritt müssen Sie die Analyseverbindungen definieren, die für die späteren mechanischen Randbedingungen innerhalb der Baugruppe notwendig sind. Hier haben Sie wiederum zwei Möglichkeiten: Entweder Sie setzen entsprechende Baugruppenbedingungen, die dann für die Vergabe der Randbedingungen verwendet werden können, oder Sie definieren die entsprechenden Analyseverbindungen. In diesem Beispiel wurden sämtliche Analyseverbindungen über das Icon 'Analyse allgemeiner Verbindungen' in der GAS-Arbeitsumgebung definiert. Damit konnte die für einen Presssitz notwendige Analyseverbindung mit Flächenkontakt nicht definiert werden. Dieser Presssitz wird mit der Baugruppenbedingung Flächenkontakt abgebildet. Der gleiche Fall liegt bei den Schraubverbindungen vor. Auch hier wird statt der Analyseverbindung mit Flächenkontakt eine Kongruenzbedingung der Baugruppe verwendet.

Beginnen Sie nun mit der Definition einer allgemeinen Analyseverbindung zwischen Kolben und Kolbenbolzen:

Definition einer allgemeinen Analyseverbindung zwischen Kolben und Bolzen

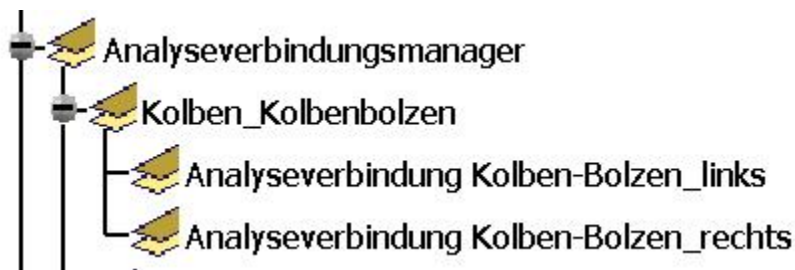


Allgemeine Analyseverbindung



11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

Selektieren Sie bei der ersten Komponente die linke äußere Mantelfläche des Kolbenbolzens sowie bei der zweiten Komponente die linke Mantelfläche der Bolzenbohrung im Kolben. Führen Sie den gleichen Vorgang auch für die rechte Seite der Bolzenbohrung aus. Darauf erhalten Sie folgenden Eintrag im Strukturbaum:

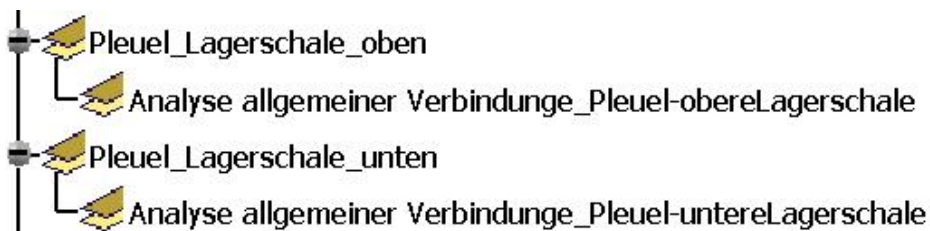


Eintrag dieser Analyseverbindungen mit sprechendem Namen im Strukturbaum

Es ist bei diesem Beispiel in jedem Fall notwendig, die erzeugten Analyseverbindungen entsprechend zu benennen, da die Vielzahl der erzeugten Verbindungen eine spätere Zuordnung ansonsten sehr schwierig gestaltet.

Weiters sind folgende Analyseverbindungen zu definieren:

- Zwischen dem Pleuel und den Lagerschalen



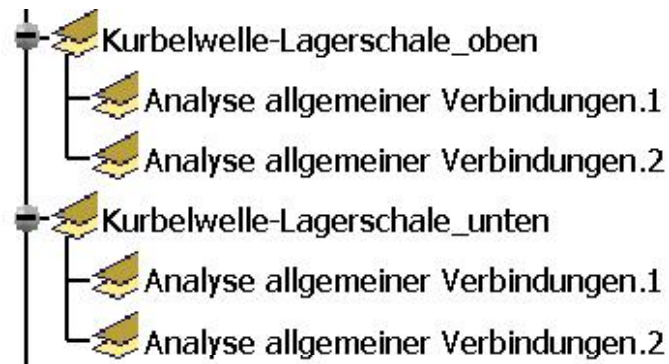
Analyseverbindungen zwischen Pleuel und Lagerschalen

- Zwischen der Kurbelwelle und den Lagerschalen

Wählen Sie die entsprechenden Mantelflächen der Lagerschalen sowie des Kurbelzapfens. Damit entstehen vier weitere Analyseverbindungen:

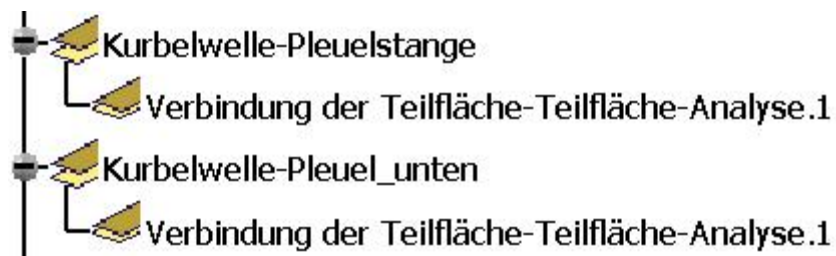
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Analyseverbindungen
zwischen Kurbelwelle
und Lagerschalen



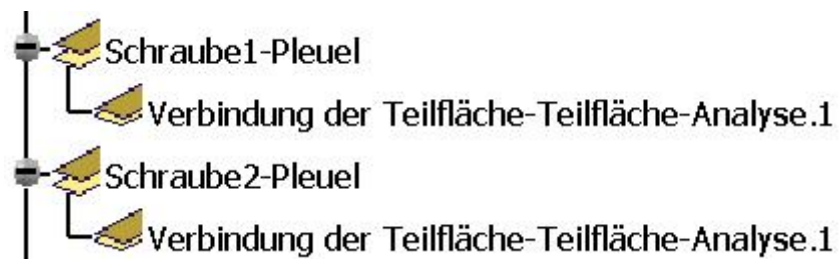
- Zwischen Pleuel und Kurbelwelle zur seitlichen Führung
Wählen Sie bei dieser Bedingung die seitlichen vertikalen Begrenzungsflächen der Kurbelwange und des Pleuels.

Analyseverbindung
zwischen Kurbelwelle
und Pleuel



- Zwischen den Schrauben und dem Pleuel
Wählen Sie hier die Auflagefläche der Schraube sowie die Auflagefläche am Pleuel.

Analyseverbindung
zwischen den
Schrauben und dem
Pleuel



- Zwischen den beiden Teilen des Pleuels

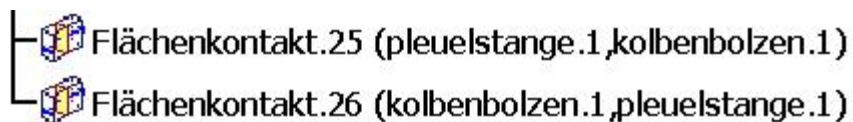
11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

Wählen Sie die ebenen Flächen, an denen das Pleuel geteilt ist.



Analyseverbindung
zwischen den beiden
Teilen des Pleuels

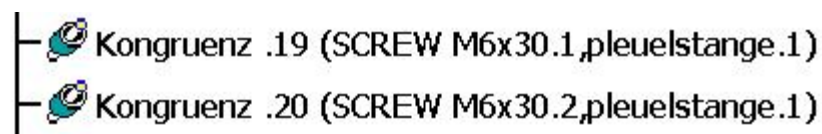
Wie schon erwähnt, ist es für die Presssitzverbindung zwischen Kolbenbolzen und Pleuel notwendig, einen Flächenkontakt in der Baugruppe zu definieren:



Flächenkontakt zwi-
schen Pleuel und Kol-
benbolzen

Selektieren Sie dazu die jeweiligen Mantelflächen von Kolbenbolzen und Pleuel.

Um die Schraubverbindung definieren zu können, ist es notwendig eine Kongruenzbedingung zwischen der Achse der Schraube und der Achse der Gewindebohrung im Pleuel zu bestimmen:



Kongruenzbedingung
zwischen Schraube
und Pleuel

Im nächsten Schritt werden nacheinander sämtliche mechanischen Randbedingungen innerhalb der Baugruppe vergeben.

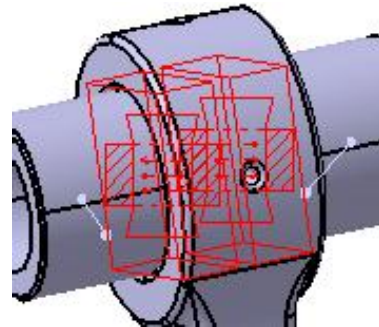
Als Erstes legen Sie den Presssitz zwischen Kolbenbolzen und Pleuel fest:



Presssitz

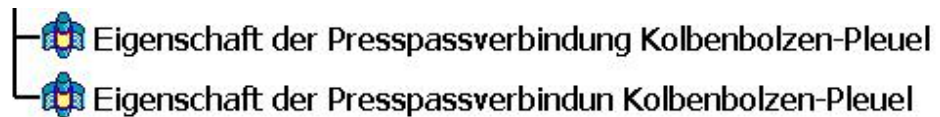
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Definition eines Presssitzes zwischen Pleuel und Kolbenbolzen



Als Stützelement selektieren Sie die zuvor definierten Kontaktbedingungen der Baugruppe, und im Feld 'Überlappung' geben Sie ein Übermaß von 5 μm ein. Daraufhin erscheint im Strukturbaum der entsprechende Eintrag unter den Eigenschaften:

Eintrag der Pressverbindung im Strukturbaum

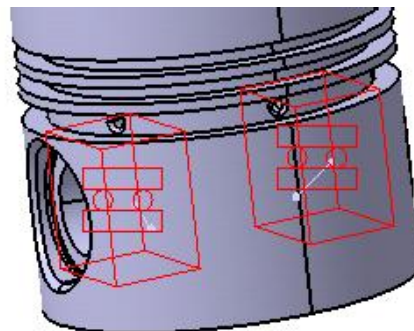


Dann definieren Sie eine Gleitbedingung für den Kolbenbolzen im Kolben:



Gleitverbindung

Definition der Gleitverbindung vom Kolbenbolzen im Kolben



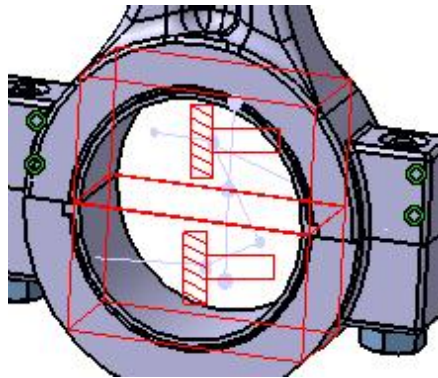
Als Support wählen Sie die Kolben-Kolbenbolzen Analyseverbindungen. Damit erhalten Sie folgenden Eintrag im Strukturbaum:

11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

- Eigenschaft der Gleitverbindung Kolben-Bolzen
- Eigenschaft der Gleitverbindung Kolben-Bolzen

Eintrag der Gleitverbindungen im Strukturbaum

Nun definieren Sie die fixe Verbindung der Lagerschalen mit dem Pleuel:



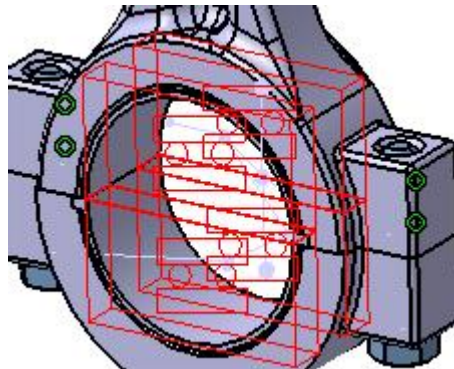
Definition einer fixierten Verbindung zwischen den Lagerschalen und dem Pleuel

Der geometrische Bezug sind die Analyseverbindungen Pleuel-Lagerschale. Im Strukturbaum stellen sich diese Verbindungen folgendermaßen dar:

- Eigenschaft der fixierten Verbindung Pleuel-Lagerschale_oben
- Eigenschaft der fixierten Verbindung Pleuel-Lagerschale_unten

Eintrag der fixierten Verbindungen im Strukturbaum

Als Nächstes definieren Sie die Gleitverbindung zwischen den Lagerschalen und der Kurbelwelle:

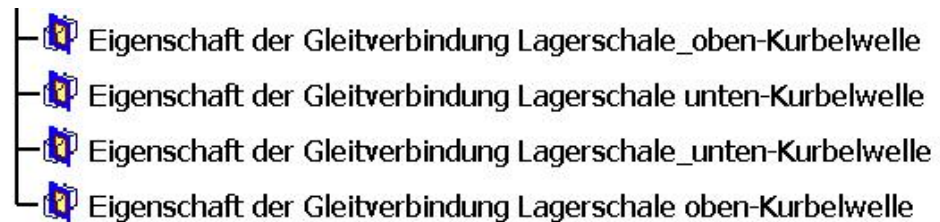


Definition einer Gleitlagerung zwischen den Lagerschalen und der Kurbelwelle

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Wählen Sie die Analyseverbindungen Kurbelwelle-Lagerschale als Stützelement. Der Eintrag im Strukturbaum hat folgendes Aussehen:

Eintrag der Gleitverbindungen im Strukturbaum

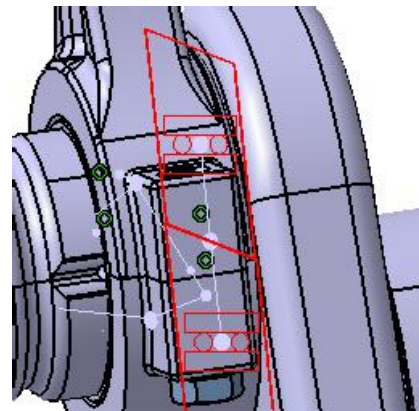


Die nächste Randbedingung ist die Gleitverbindung zwischen der Kurbelwange und der seitlichen Fläche des Pleuels, um eine axiale Verschiebung zu verhindern:

Definition einer Gleitverbindung zwischen Kurbelwange und Pleuel

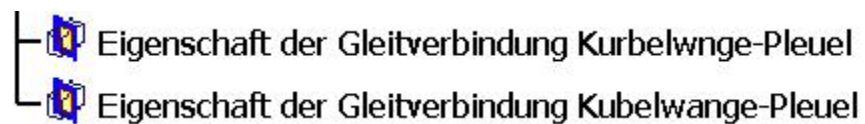


Gleitverbindung



Selektieren Sie die Analyseverbindungen Kurbelwelle-Pleuelstange sowie Kurbelwelle-Pleuel_unten als Bezugsgeometrie. Sie erhalten folgenden Strukturbaumeintrag:

Eintrag dieser Verbindung im Strukturbaum



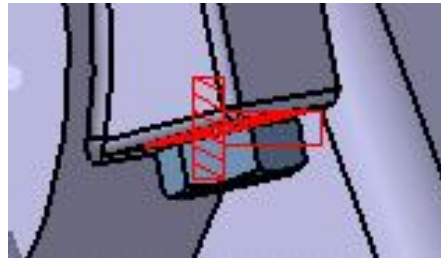
Schlussendlich ist noch die Schraubverbindung zwischen den beiden Pleuelhälften zu definieren.

11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

Beginnen Sie mit einer fixierten Verbindung zwischen der Auflagefläche der Schraube und dem Pleuel:



Fixierte Verbindung



Definition von fixierten
Verbindungen zwischen
Schrauben und Pleuel

Als Support bestimmen Sie die Analyseverbindungen Schraube-Pleuel, worauf folgender Eintrag im Strukturbaum erscheint:



Eigenschaft der fixierten Verbindung Schraube1-Pleuel



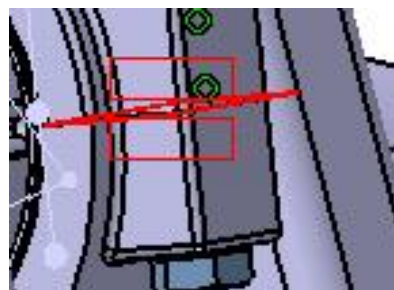
Eigenschaft der fixierten Verbindung Schraube2-Pleuel

Eintrag im Struktur-
baum

Dann definieren Sie eine Kontaktverbindung zwischen den Trennflächen der beiden Pleueihälften:



Kontaktverbindung



Definition einer Kon-
taktverbindung zwi-
schen den beiden Teil-
en des Pleuels

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Wählen Sie als Stützelement die Analyseverbindungen Pleuelstange-Pleuel_unten. Darauf erscheint folgender Strukturbaumeintrag:

Eintrag der Kontaktver-
bindung im Struktur-
baum

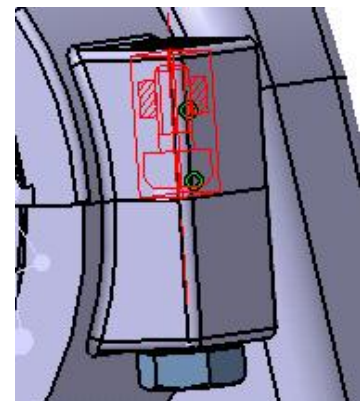


Als letzte Verbindung ist die Schraubverbindung selbst festzulegen:



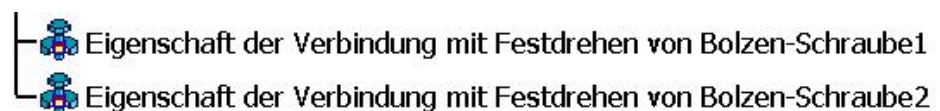
Schraubverbindung

Definition einer
Schraubverbindung



Als Stützelement ist in diesem Fall die zuvor erwähnte Kongruenzbedingung zwischen der Achse der Schraube und der Gewindebohrung zu selektieren. Die Vorspannkraft der Schraube ist im Feld 'Festdrehstärke' mit 2000N einzugeben. Der Strukturbaum erhält einen weiteren Eintrag:

Eintrag der Schraubver-
bindung im Struktur-
baum



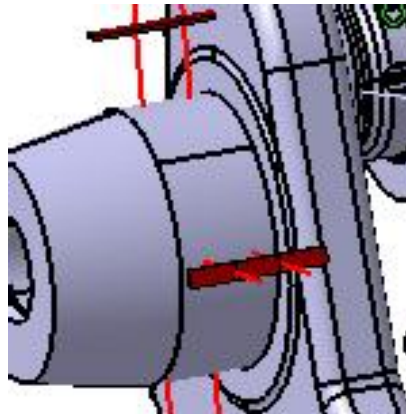
Damit sind alle Randbedingungen innerhalb der Baugruppe gesetzt.

11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

Nun ist die Baugruppe noch nach außen hin zu lagern. Vergeben Sie zuerst ein Flächenloslager für die linke Seite der Kurbelwelle:



Flächenloslager



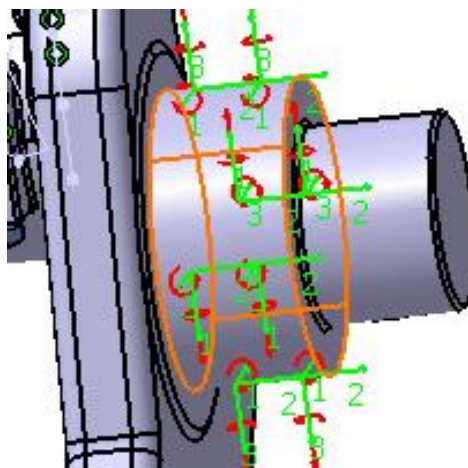
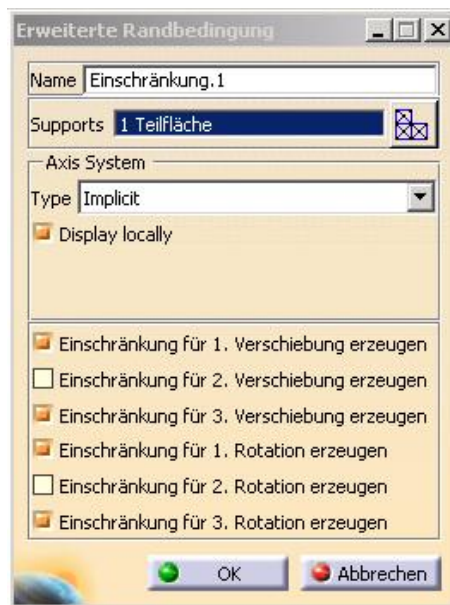
Definition eines Flächenloslagers für die linke Lagerstelle der Kurbelwelle

Die Bezugsgeometrie ist die Mantelfläche der Lagerstelle.

Auf der rechten Seite der Kurbelwelle definieren Sie die Lagerung mit einer erweiterten Bedingung:



Erweiterte Bedingung



Definition des rechten Kurbelwellenlagers über eine erweiterte Bedingung

11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

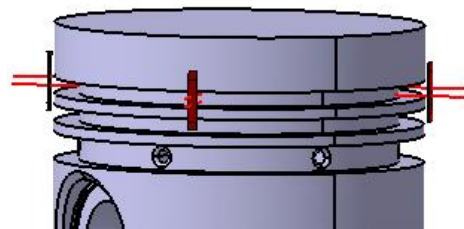
Als Support ist wieder die Zylindermantelfläche der Lagerstelle zu wählen. Stellen Sie das Koordinatensystem auf implizit ein, womit Sie ein zylindrisches Koordinatensystem angezeigt bekommen, und geben Sie die 2. Verschiebung sowie die 2. Rotation frei.

Als Nächstes ist die Führung des Kolbens über die Kolbendichtringe zu definieren. Auch diese Randbedingung kann durch eine Flächenloslagerbedingung abgebildet werden:



Flächenloslager

Definition eines Flächenloslagers zur Führung des Kolbens durch den Dichtring

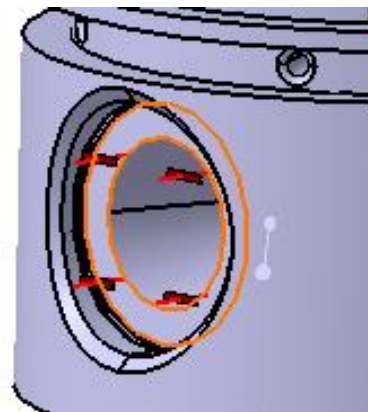


Hier wählen Sie die Mantelflächen des Einstichs für den Dichtring als geometrischen Bezug.

Um ein axiales Verschieben des Kolbenbolzens entlang der Bolzenbohrung im Kolben zu vermeiden, wird dieser durch Sicherungsringe fixiert. Dies ist wiederum über ein Flächenloslager abbildbar:

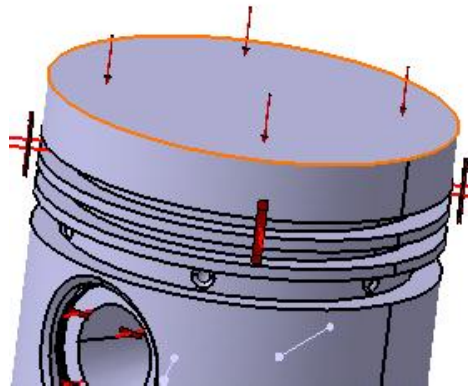


Definition eines Flächenloslagers, um die axiale Verschiebbarkeit des Bolzens zu sperren



11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

Zuallerletzt ist die Belastung der Baugruppe aufgrund des Verbrennungsvorgangs festzulegen. Der Spitzendruck beträgt in diesem Fall 45 bar und ist über den Befehl 'Druck' aufzubringen:



Definition der Druckbelastung von 45 bar auf den Kolbenboden

Da auch der Druck in MPa angegeben wird, ist er entsprechend umzurechnen, was 4,5 MPa ergibt. Die Bezugsfläche für den Druck ist der Kolbenboden.

Eine Überprüfung der Randbedingungen können Sie mit der Datei *Kurbeltrieb_V_Motor_fem.CATAnalysis* durchführen.

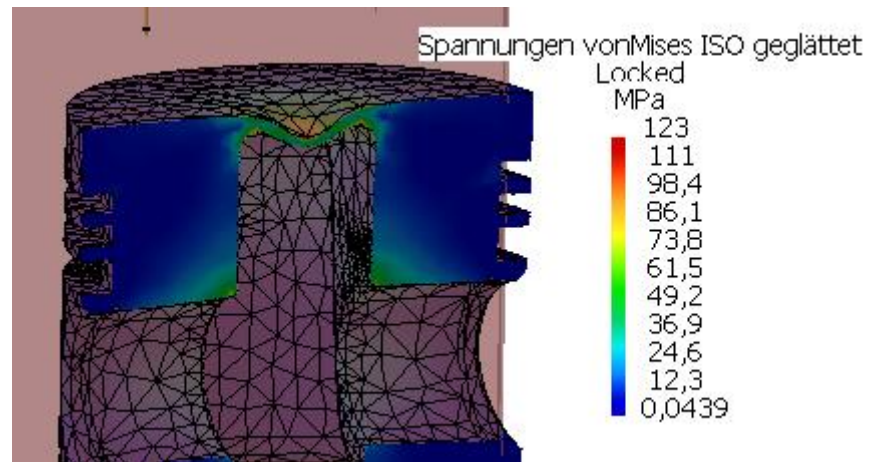
Nun steht einer ersten Berechnung nichts mehr im Wege. Führen Sie die erste FEM-Berechnung dieser Baugruppe mit linearen Tetraeder-Elementen durch und überprüfen Sie die Plausibilität der Ergebnisse.

Danach ist eine Verfeinerung des Netzes mit parabolischen Tetraeder-Elementen (TE10) angebracht. Kontrollieren Sie auch den globalen Fehler, der nicht größer als 10% sein sollte. Gegebenenfalls führen Sie eine Berechnung mit Adaptivität durch, aber Achtung: Die benötigten Systemressourcen sind beträchtlich.

Diese FEM-Analyse bringt folgende Ergebnisse, wobei eine quantitative Spannungsaussage getätigt werden kann. Dargestellt sind die Vergleichsspannungen für die einzelnen Bauteile sowie für die Baugruppe. Beim Kolben wurde ein Schnitt durch den Bauteil gelegt:

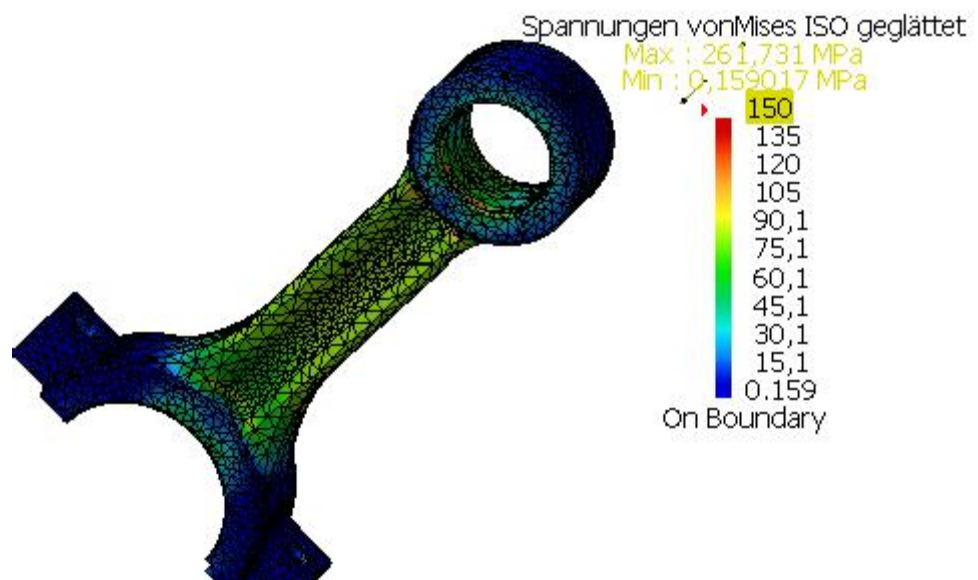
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Spannungsverlauf
innerhalb des Kolbens



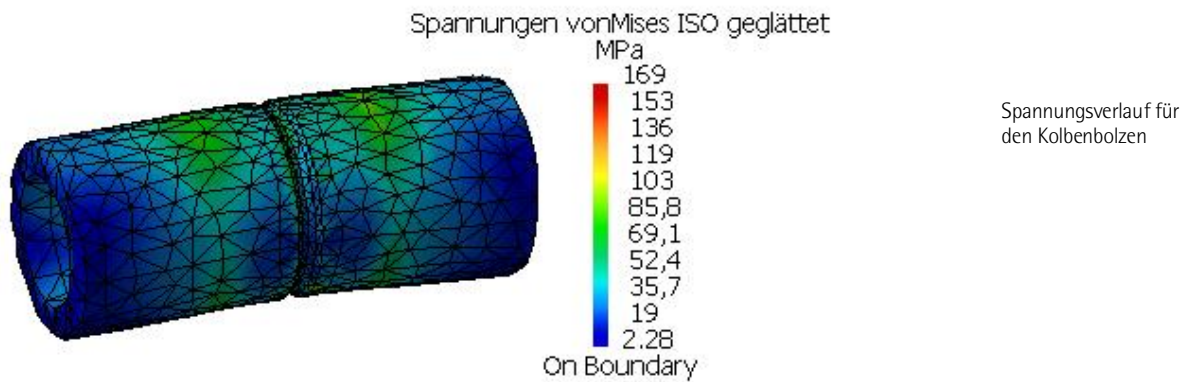
Die Vergleichsspannungen zeigen eine kritische Spannungszone im Bereich des Kolbenbodens, der konstruktiv mit einer zu geringen Wandstärke ausgelegt wurde.

Vergleichsspannungen
für die Pleuelstange

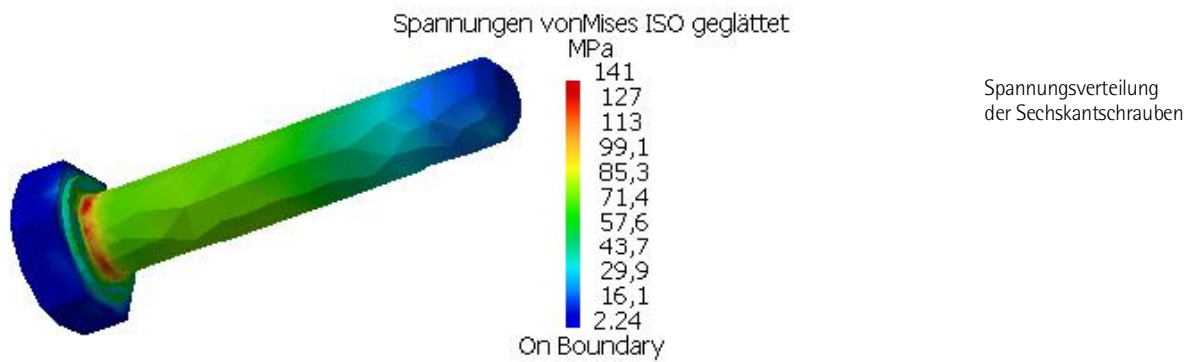


Das Pleuel zeigt hohe Druckspannungen im Bereich des Schaftes, hier wäre eine Knickanalyse sinnvoll.

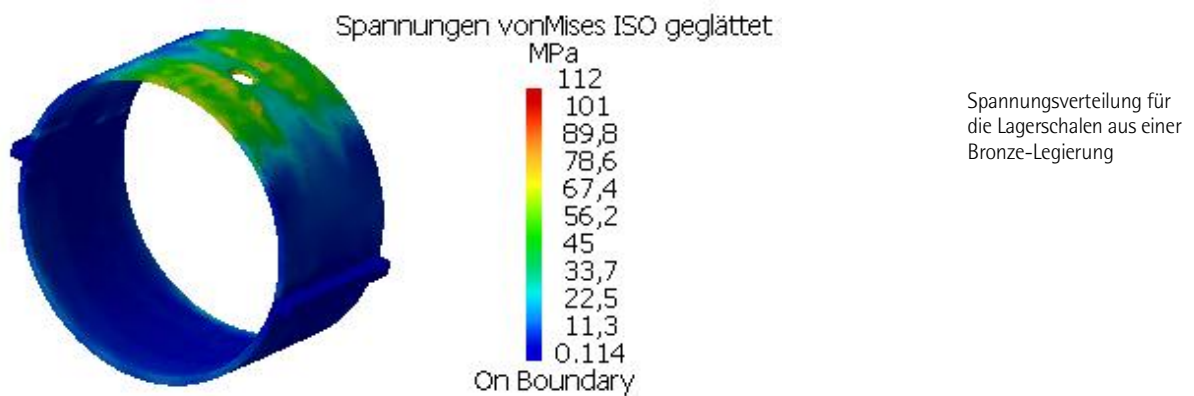
11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors



Der Bolzen zeigt hohe Spannungen aufgrund des Presssitzes und der Druckbelastung.

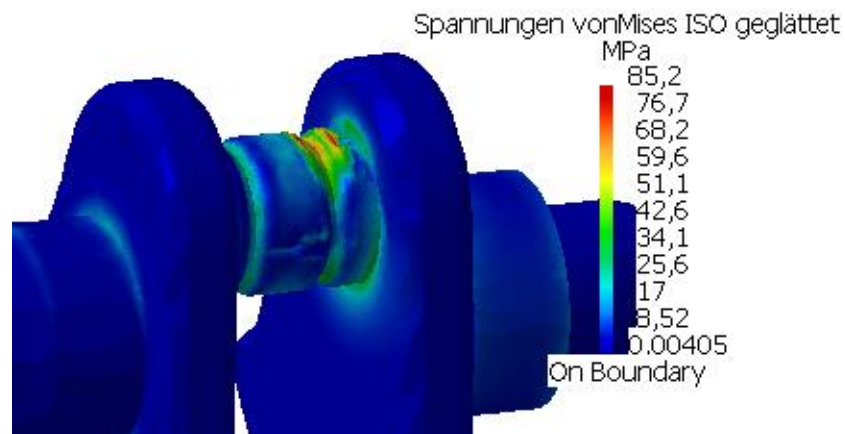


Die Schrauben werden durch die Vorspannung auf Zug beansprucht.



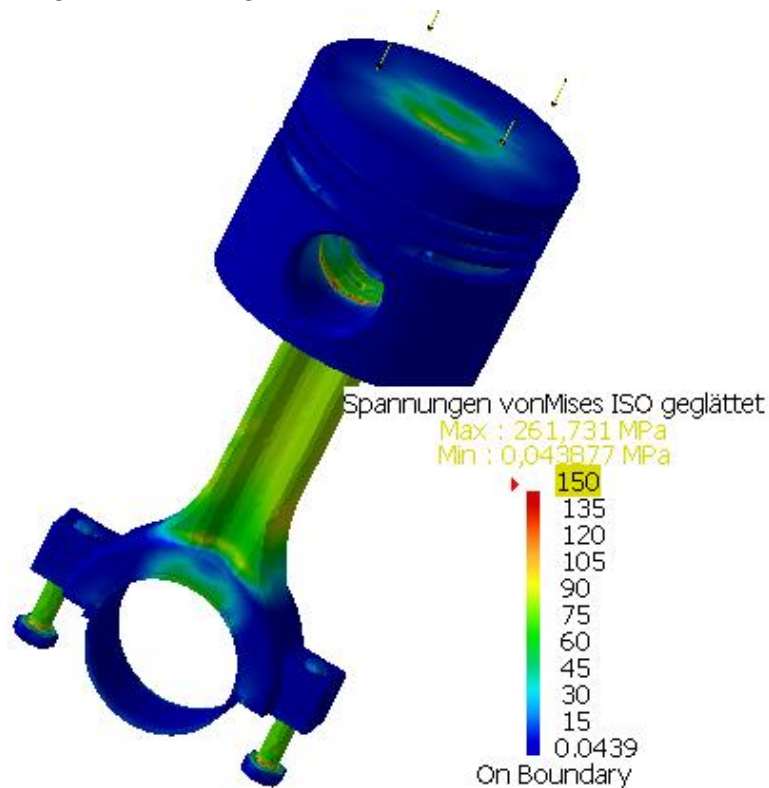
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Spannungsverteilung
für die Kurbelwelle



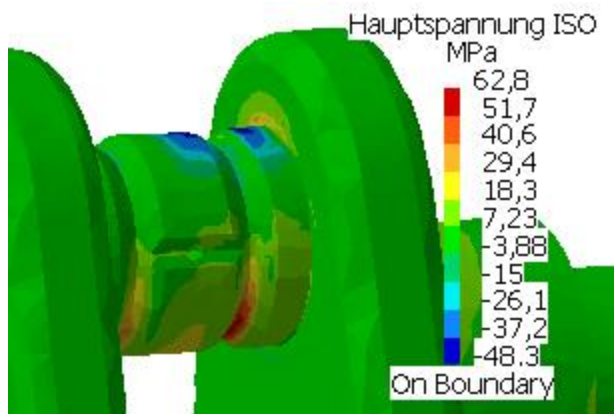
Die größten Belastungen der Kurbelwelle treten im Bereich des Kurbelzapfens auf.

Darstellung der Ver-
gleichsspannungen für
ausgewählte Teile der
Baugruppe



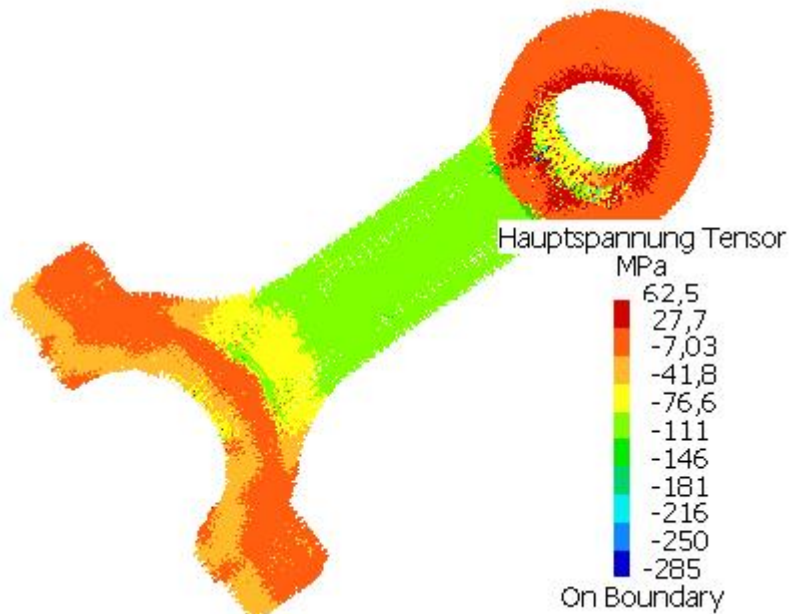
11.4 Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors

Eine Analyse der Hauptnormalspannungen erbringt folgende Ergebnisse für die Kurbelwelle:



Hauptnormalspannungen (Filter C1) für die Kurbelwelle

Es ist deutlich der Druckbereich an der Oberseite des Kurbelzapfens sowie der Zugbereich an der Unterseite zu erkennen.

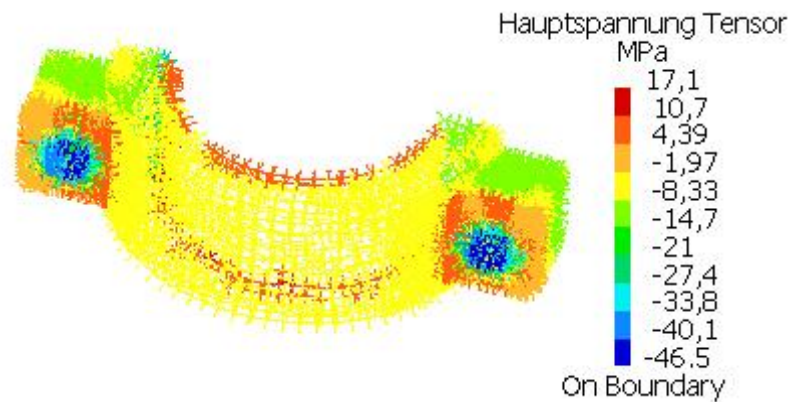


Hauptnormalspannungen in der symbolischen Darstellung für das Pleuel

Die Hauptnormalspannungen für das Pleuel zeigen eine hauptsächlich Druckbeanspruchung. Die Maximalwerte liegen bei 285 N/mm².

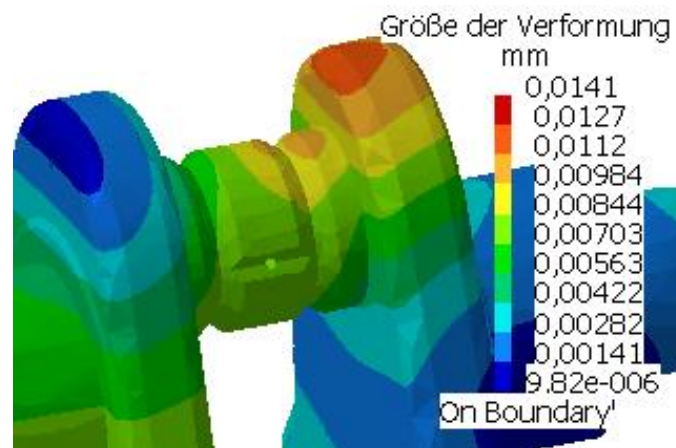
11 Übungsbeispiele zu Baugruppen

Hauptnormalspannungen für den unteren Teil des Pleuels



Die Hauptnormalspannungen im unteren Teil des Pleuels zeigen deutlich die Flächenpressung die durch den Schraubenkopf aufgrund der Vorspannung verursacht wird.

Verformungen der Kurbelwelle



Das abschließende Bild der Verformungen der Kurbelwelle zeigt maximale Werte von 14 μm im Bereich der Kurbelwange. Im Bereich der Lagerschalen tritt eine Verformung von 10 μm auf, was zulässig ist.

Es könnten für diese FEM-Analyse noch viele weitere interessante Auswertungen durchgeführt werden. Sie erhalten die Ergebnisse auch nach Berechnung mit der Datei *Kurbeltrieb_V_motor_fem_parabolisch.CATAnalysis*.

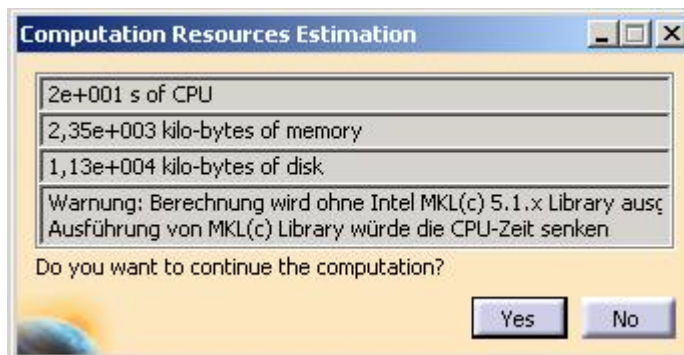
12 Hinweise für die Anwender

Im abschließenden Kapitel finden sich noch einige wertvolle Hinweise für die Benutzer der CATIA-FEM Arbeitsumgebung.

12.1 Verwendung der Intel MKL-Library

Um eine Verbesserung der Performance für Windows-Maschinen mit Intel-Prozessoren zu erhalten, empfiehlt sich eine Installation der Mathematical Kernel Library von Intel (MKL5.1). Man kann diese unter dem folgenden Link downloaden: <http://developer.intel.com/software/products/index.htm>

Vor dem tatsächlichen Starten der Berechnung erhält man folgenden Hinweis:



Abschätzung der
benötigten System-
ressourcen

Die Installation der MKL-Library reduziert die bei der Berechnung benötigte CPU-Zeit.

Nach dem Download sollten Sie die Installation in folgendes Verzeichnis ausführen: X:\Programme\intel\MKL\ia32\bin.

Anschließend ist es nur noch notwendig, diesen Link in die PATH environment-Variable einzutragen:

X:\Programme\intel\MKL\ia32\bin

Der Download der MKL 5.1 Version ist kostenlos, höhere Versionen sind gebührenpflichtig.

12 Hinweise für die Anwender

12.2 Modellprüfprogramm

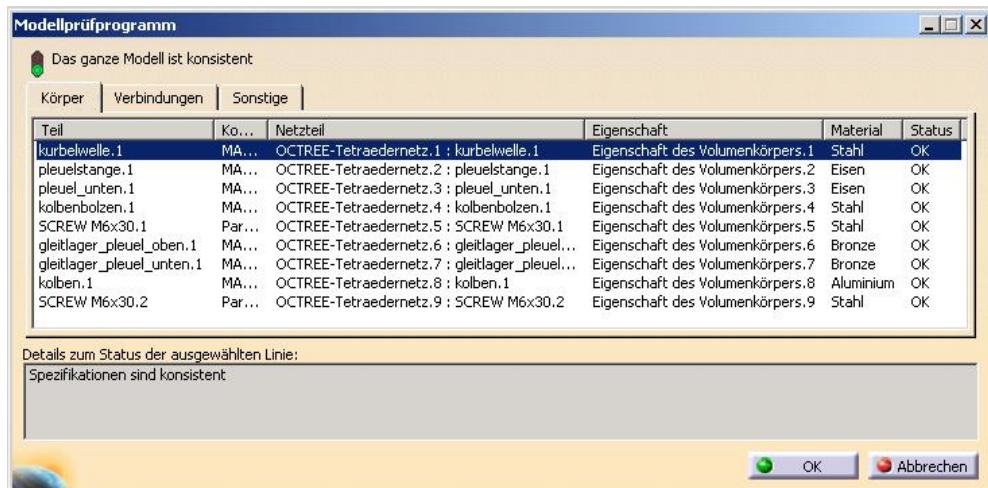
In der GPS-Arbeitsumgebung ist auch ein Befehl zur Überprüfung des FEM-Modells vorhanden:



Modellprüfprogramm

Damit können einige Konsistenzprüfungen des Modells durchgeführt werden. In der Kartei 'Körper' wird die korrekte Zuordnung eines Materials überprüft:

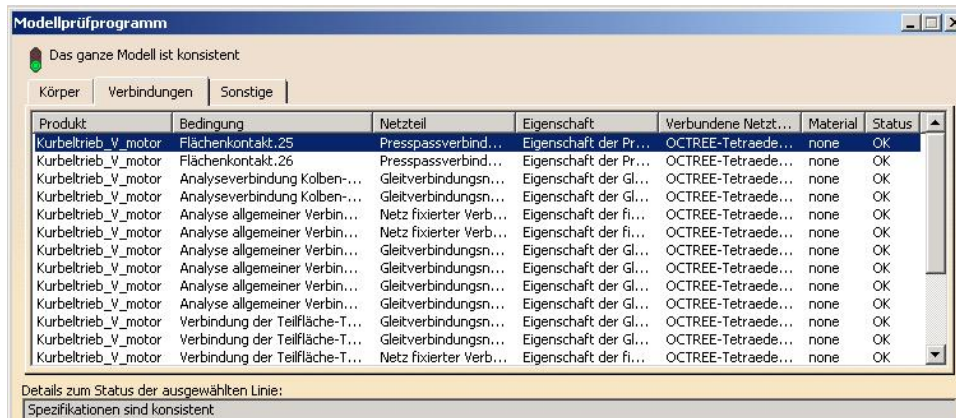
Durchführen einer
Modellprüfung



Der angezeigte Status sollte jeweils auf OK stehen. Sollte der Status KO ausgewiesen werden, ist eine erneute Zuordnung des Materials vorzunehmen.

In der Kartei 'Verbindungen' ist es möglich, eine Überprüfung der vorhandenen mechanischen Verbindungen innerhalb einer Baugruppe durchzuführen. Die sieht beispielhaft folgendermaßen aus:

12.3 Elemente gruppieren



Überprüfung der definierten mechanischen Verbindungen

Auch hier sollte die Systemmeldung 'Spezifikationen sind konsistent' erfolgen.

In der Kartei 'Sonstige' werden alle anderen eventuell vorhandenen Inkonsistenzen aufgezeigt. Dies kann zum Beispiel eine fehlende Netzzuordnung für eine Randbedingung (es wurde als Stützelement eine Linie gewählt, der kein finites Element zugeordnet ist) sein.

12.3 Elemente gruppieren

Dieser Befehl dient dazu, Elemente der gleichen Kategorie zu gruppieren und so gemeinsam selektieren zu können. Dies hilft vor allem bei speziellen Auswertungen, kann aber auch bei der Definition der Randbedingungen sinnvoll sein. Folgende Icons stehen zur Verfügung:



Icons zum Gruppieren von Elementen

Damit können Punkte, Linien, Flächen und Körper in einer Gruppe zusammengefasst werden. Weiters gibt es die Möglichkeit, eine Gruppe über einen Würfel bzw. über eine Kugel zu selektieren.

Der Vorteil der Gruppierung ist einerseits eine Verringerung des Aufwands bei der Selektion und andererseits die Möglichkeit gezielter Auswertungen für genau diese Gruppe.

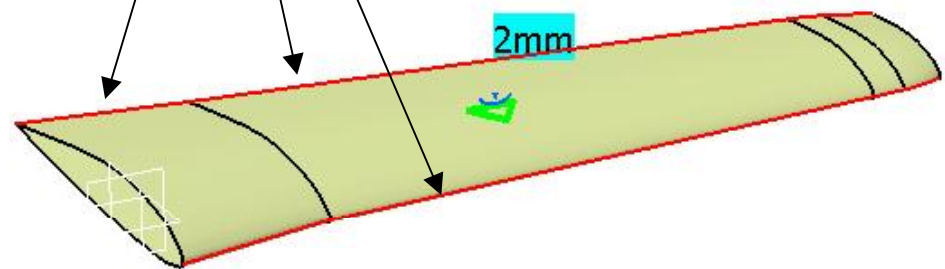
Bei der Definition einer Gruppe ist wie folgt vorzugehen:

12 Hinweise für die Anwender



Definition einer Liniengruppe

Definition einer Liniengruppe, bestehend aus acht Kanten



Nach dem Aufruf des entsprechenden Icons wählen Sie im Eingabefenster die gewünschten Linien. In diesem Fall sind dies die Begrenzungen des Tragflügels.

Eintrag der Gruppe im Strukturbaum



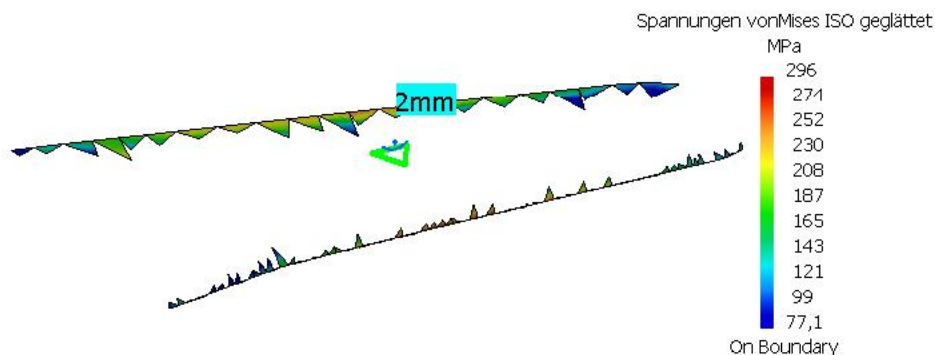
Damit kann für diese Liniengruppe eine spezielle Auswertung durchgeführt werden. Hier sollen die Vergleichsspannungen nur für diese 8 Kanten ausgewertet werden. Rufen Sie die Auswahlliste 'Selections' über einen Doppelklick auf die VonMises-Vergleichsspannungen im Strukturbaum auf. Dort gibt es nun den entsprechenden Eintrag für die soeben erzeugte Liniengruppe:

12.4 Speichern und Versenden von Ergebnisdaten



Selektion der zuvor definierten Liniengruppe

Nach Selektion dieser Gruppe erhalten Sie folgendes Ergebnis:



Auswertung der Vergleichsspannungen für diese Liniengruppe

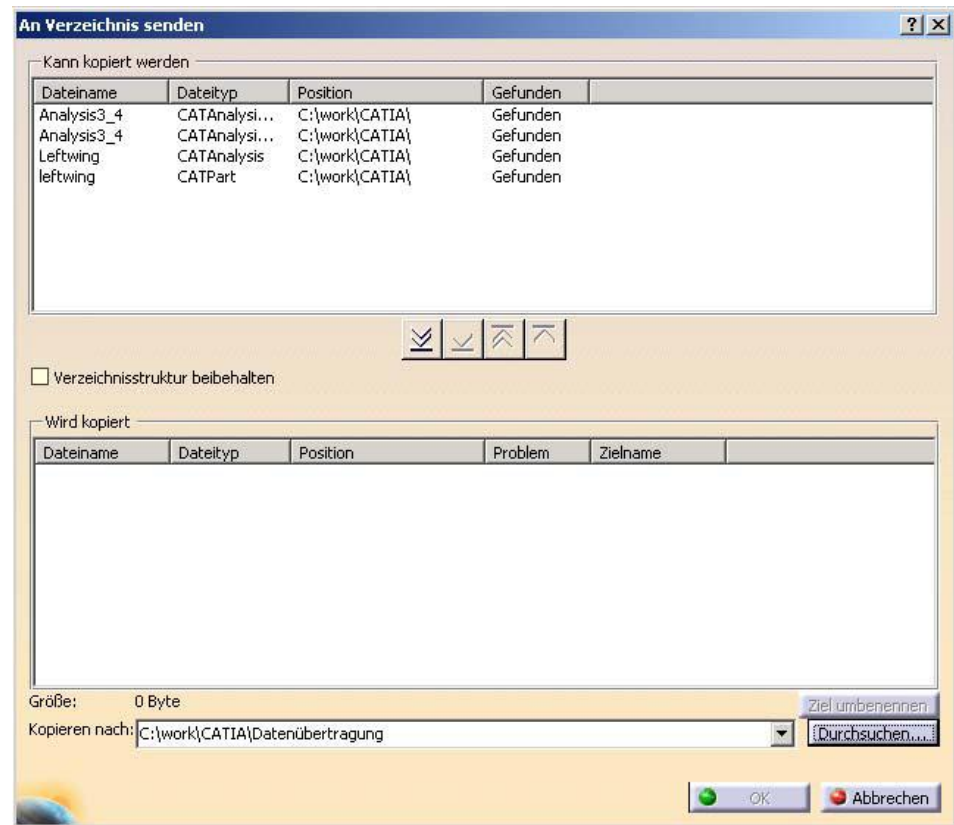
Die Vergleichsspannungen werden nur für die ausgewählte Liniengruppe dargestellt. Die Gruppierung kann auch zur gemeinsamen Definition von Randbedingungen für eine Gruppe verwendet werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ein entsprechender Reaktionssensor dann auch nur für diese Gruppe und nicht für Teile davon ermittelt werden kann.

12.4 Speichern und Versenden von Ergebnisdaten

Wie bereits erwähnt, werden die Berechnungsdaten nicht im CATAnalysis-File gespeichert, sondern in ein spezielles, vom Benutzer zu wählendes Verzeichnis. Um nun eine Übertragung der Berechnungsdaten auf einen anderen Computer zu ermöglichen, gibt es folgenden Weg. Gehen Sie auf 'Datei' und 'Senden an' und dann auf Verzeichnis:

12 Hinweise für die Anwender

Auswahlliste für
das Versenden von
Dateien



Im angeführten Bild werden für eine durchgeführte FEM-Analyse alle notwendigen Dateien (auch die Berechnungsdateien) angezeigt. Wählen Sie im Feld 'Kopieren nach' das gewünschte Verzeichnis, in das die Dateien übertragen werden sollen. Anschließend markieren Sie diejenigen Dateien, die in das Verzeichnis kopiert werden sollen, und verschieben Sie sie mit folgendem Icon:



Alle Dateien kopieren

Diese Dateien erscheinen dann im unteren Teil des Eingabefeldes, und die Gesamtgröße wird angezeigt. Achten Sie darauf, dass Berechnungsdateien sehr groß (mehrere Gigabyte) sein können.

12.5 Optimierung von Bauteilen (Knowledgeware)

Nach erfolgreichem Datentransfer erhalten Sie eine Anzeige des Ergebnisses:



Protokoll des
durchgeführten
File-Transfers

Wenn Sie nun das vorhin bestimmte Verzeichnis verschicken, stehen auch die Berechnungsdaten zur Verfügung.

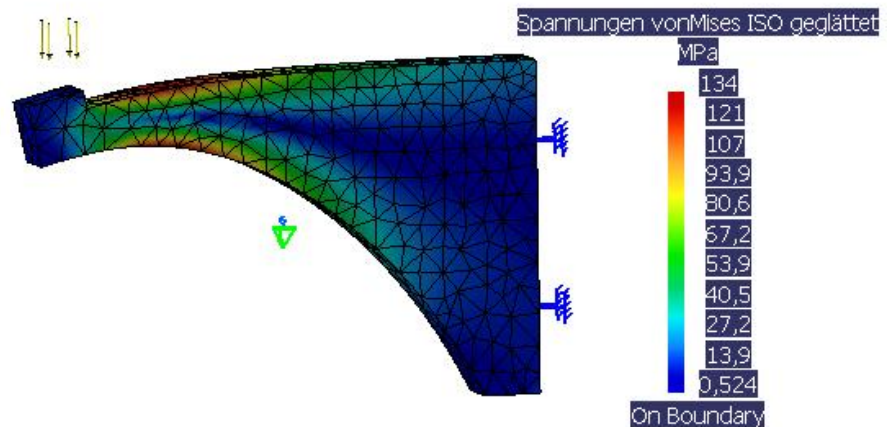
12.5 Optimierung von Bauteilen (Knowledgeware)

Damit ist es möglich, Bauteile hinsichtlich ihrer Geometrie automatisch zu optimieren. Dies soll an einem einfachen Beispiel veranschaulicht werden.

Gegeben ist eine Versteifungsrippe, die einen vorgegebenen Spannungswert von 100 N/mm^2 nicht überschreiten soll. Öffnen Sie dazu die Datei *Rippe_Optimierung_start.CATAnalysis*. Nach Durchführung der Berechnung sehen Sie, dass die maximalen Spannungen im Bereich von 134 N/mm^2 liegen:

12 Hinweise für die Anwender

Spannungsverlauf in
der Rippe vor der
Optimierung



Die Geometrie der Rippe soll nun so optimiert werden, dass die maximal auftretende Spannung 100 N/mm^2 nicht mehr überschreitet. Diese Optimierung soll automatisch vom System mit Hilfe der Knowledgeware durchgeführt werden.

Dazu ist es im ersten Schritt notwendig, einen Parameter des Typs Druck zu vergeben:



Parameter

Festlegen eines
Parameters des
Typs Druck

Formeln: Analysemanager

☐ Schrittweise

Importieren...

Filter für Analysemanager

Filtername:

Filtertyp: Alle

Zum Bearbeiten doppelt auf einen Parameter klicken

Parameter	Wert	Formel	Aktiv
`Knoten und Elemente\OCTREE-Tetraedernetz.1 : Versteifun...	maßstäblich		
`Knoten und Elemente\OCTREE-Tetraedernetz.1 : Versteifun...	nicht maßstäblich		
`Knoten und Elemente\OCTREE-Tetraedernetz.1 : Versteifun...	3		
`Knoten und Elemente\OCTREE-Tetraedernetz.1 : Versteifun...	ShapeFactor		
`Finites Elementmodell.1\Druck.1\Druck`	10MPa		
`Finites Elementmodell.1\Energie\Energie`	0,06J	Valuated by :Energie	
Maximale_Spannung	0MPa		

Name oder Wert des aktuellen Parameters bearbeiten

Maximale_Spannung 100MPa

Neuer Parameter des Typs Druck Mit Einem Wert

Formel hinzufügen

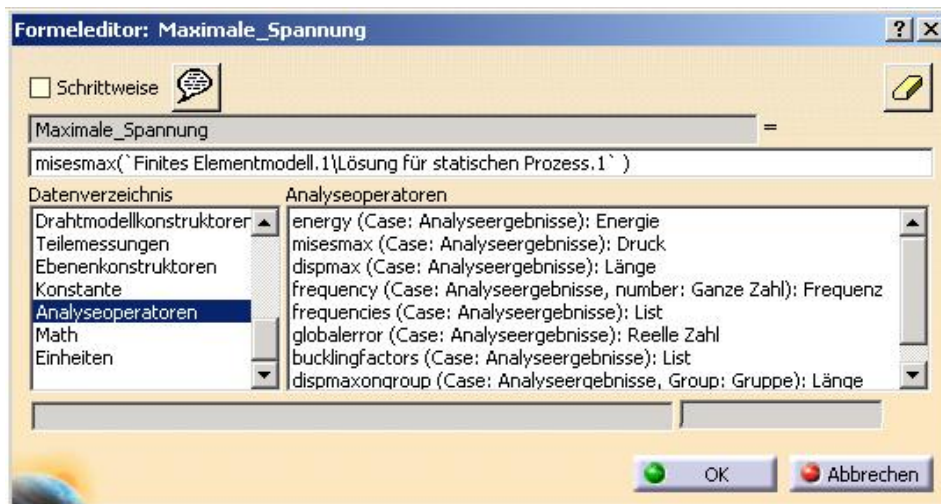
Parameter löschen

Formel löschen

OK Anwenden Abbrechen

12.5 Optimierung von Bauteilen (Knowledgeware)

Im angezeigten Eingabefenster wählen Sie einen Parameter des Typs Druck und nennen ihn 'Maximale_Spannung'. Vergeben Sie einen Wert von 100 N/mm² für diesen Parameter. Dann selektieren Sie den Button 'Formel hinzufügen':



Einträge im
Formeleditor

Im daraufhin erscheinenden Fenster selektieren Sie die Analyseoperatoren und bestimmen 'misesmax' als Kriterium. Dann bestimmen Sie die Lösung des statischen Prozesses1 im Strukturbaum als Startkriterium für die Optimierung. Sie sollten folgenden Eintrag im oberen Eingabefeld erhalten:

misesmax(`Finites Elementmodell.1\Lösung für statischen Prozess.1`)

Danach bestätigen Sie Ihre Eingaben mit der Taste 'OK'.

Im nächsten Schritt starten Sie die Arbeitsumgebung 'Product Engineering Optimizer'. Dies können Sie über die Favoriten oder über Start und Knowledgeware ausführen:



Product Engineering Optimizer

Arbeitsumgebung
Product Engineering
Optimizer

12 Hinweise für die Anwender

Danach rufen Sie in dieser Arbeitsumgebung folgendes Icon auf:



Optimieren

Damit erhalten Sie ein weiteres Fenster:

Definition der Optimierungskriterien

Optimierung

Problem | Bedingungen | Ergebnisse der Berechnungen

Optimierungstyp: Zielwert

Optimierter Parameter

Maximale_Spannung: 133,917MPa Auswählen...

Zielwert: 100MPa

Freie Parameter

Name	Wert	Unterber...	Oberberei...	Schritt
Versteifungsrippe\...	55mm	50mm	65mm	Auto.
Versteifungsrippe\B...	10mm	8mm	12mm	Auto.
Versteifungsrippe\L...	90mm	80mm	100mm	Auto.

Liste bearbeiten... Bereiche und Schritt bearbeiten...

Verfügbare Algorithmen

Algorithmustyp: Algorithmus für simuliertes Ausglühen

Ausgewählte Algorithmeinstellungen

Ausführungskriterien

Konvergenzgeschwindigkeit: Schnell

Beendigungskriterien

Maximale Anzahl Aktualisierungen: 200

☒ Aufeinander folgende Aktualisierungen ohne Verbesserungen: 50

☒ Maximale Zeit (Minuten): 5

Optimierungsdaten

☒ Optimierungsdaten sichern

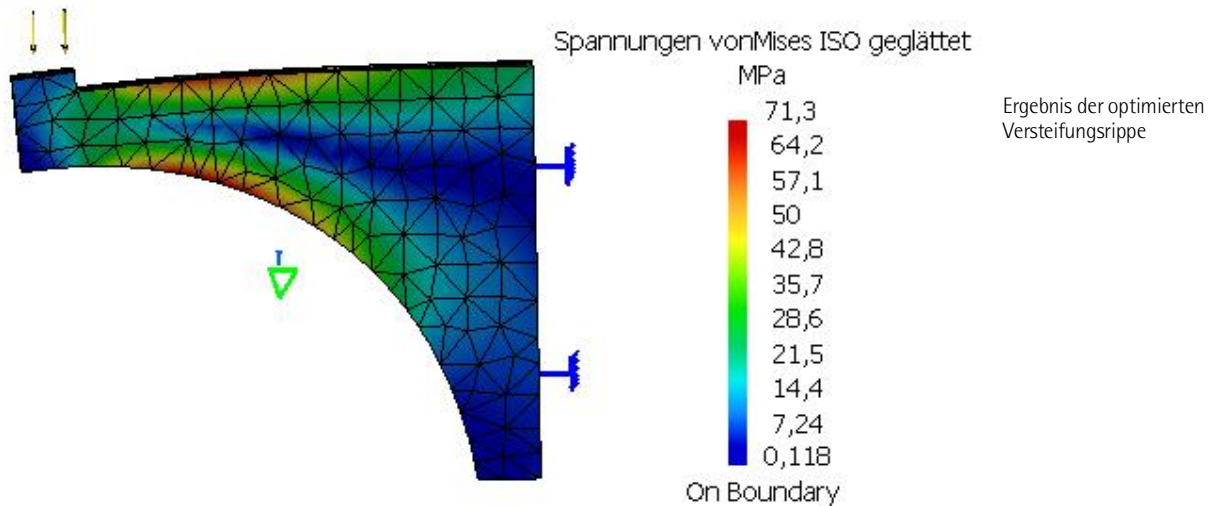
Optimierung ausführen ☐ Mit Darstellung der Aktualisierung ☒ Ohne Darstellung der Aktualisierung

OK Anwenden Abbrechen

12.5 Optimierung von Bauteilen (Knowledgeware)

Im angeführten Eingabefenster bestimmen Sie als Optimierungstyp den Zielwert und wählen den Parameter 'Maximale_Spannung', der zuvor definiert wurde. Der Zielwert wird, wie schon erwähnt, mit 100 N/mm^2 festgelegt. Dann müssen Sie noch freie Parameter wählen, die vom System variiert werden können. Dies erfolgt über den Knopf 'Liste bearbeiten'. Wählen Sie aus der angeführten Liste die in der Konstruktionsdatei für die Rippe vergebenen Parameter Höhe, Länge, Breite und Abstand_Kraft. Für jeden dieser vier Parameter sollen außerdem ein unteres und ein oberes Limit sowie eine Schrittweite festgelegt werden. Verwenden Sie dazu den Button 'Bereiche und Schritt bearbeiten'. Der Optimierungslauf wird über den Knopf 'Optimierung ausführen' gestartet. Geben Sie noch einen entsprechenden Namen für den Excel-File, in den die Ergebnisse gespeichert werden sollen, an, womit der Optimierungszyklus beginnt. Nach der angegebenen Zeit wird der Zyklus beendet, auch wenn der Zielwert noch nicht erreicht ist.

Das Ergebnis sieht wie folgt aus:



Dazu ist es auch möglich, den entsprechenden Excel-File zu öffnen, der folgendes Bild der Optimierungsschritte zeigt:

12 Hinweise für die Anwender

Ergebnisse der
Optimierung in ei-
ner Excel-Tabelle

Nb Evals	Best (MPa)	Maximale_Spannung (MPa)	Hoehe (mm)	Breite (mm)	Abstand_kraft (mm)	Laenge (mm)
0	152,029	152,029	30	10	10	84,8056
1	148,485	148,485	30,6239	12,0322	10	84,2109
2	148,485	149,889	31,4974	14,8773	10	83,3783
3	138,866	138,866	37,8585	11,3769	10	83,7434
4	132,849	132,849	47,9869	10,4595	10	83,0889
5	130,944	130,944	62,1666	10	10	82,1726
6	130,944	130,944	62,1666	10	10	82,1726
7	71,3524	71,3524	62,1666	11,6992	13,869	82,1726
8	71,3524	41,7423	62,1666	14,0782	19,2856	82,1726

Es ist ersichtlich, dass die Optimierung sich um den gewählten Zielwert einschwingt und diesen auch erreicht, falls die Zeit großzügig genug angegeben wird.

12.6 Schnittstellen zu anderen Produkten

Die Software CATIA hat Schnittstellen zu fast allen gängigen FEM-Berechnungsprogrammen. Die Teile können im GPS- oder GAS-Modul vernetzt und dann exportiert und mit einem anderen Solver berechnet werden. Die wichtigsten Kooperationen von Dassault Systemes sind:

- MSC.Software (Nastran/Patran)
- LMS International (Kinematik-Mehrkörpersimulation: DADS)
- HKS (Abaqus)
- ICEM CFD Engineering (Ansys)

12.7 Allgemeine Hinweise

Abschließend noch einige Hinweise, die ein effizientes Arbeiten bei einer FEM-Analyse ermöglichen:

- Nachdem FEM-Berechnungen einen hohen Bedarf an Systemressourcen haben, ist eine entsprechende Hardware zu wählen.
- Bilden Sie die Randbedingungen möglichst realitätsgetreu ab. Es gilt dabei folgende Regel: Je näher die kritischen Spannungen in der Nähe der Lagerung liegen, desto wichtiger ist eine genaue Abbildung dieser Randbedingungen.
- Verwenden Sie nach Möglichkeit die MKL-Library.
- Passen Sie die Vernetzung den Erfordernissen an. Verwenden Sie für dünnwandige Bauteile nach Möglichkeit stets Schalenelemente. Definieren Sie die Netz-

12.7 Allgemeine Hinweise

größe nicht unnötigerweise zu fein. In unkritischen Bereichen kann durchaus ein gröberes Netz gewählt werden. In kritischen Spannungsbereichen definieren Sie lokal ein feineres Netz bzw. eine lokale Adaptivität.

Aus der eigenen Erfahrung kann ich sagen, dass die CATIA FEM-Arbeitsumgebung sehr gute Berechnungsergebnisse liefert. Dies ist noch dazu mit den Vorteilen einer einheitlichen Datenbasis und einer sehr einfachen, intuitiven Bedienbarkeit verbunden.

Literaturverzeichnis

ZIENKIEWICZ O. C., Methode der finiten Elemente, Carl Hanser Verlag, München-Wien, 1997
ISBN 3-446-12525-6

BATHE Klaus-Jürgen, Finite Elemente Methoden, Springer-Verlag, 1998
ISBN 3-540-15602-X

CELIGOJ Christian, Skriptum zur Vorlesung Finite Elemente Berechnungen;
TU Graz, 2002

CATIA V5 Solutions, Version 5 Release 12, English online documentation, Dassault Systemes, Paris 2003

Index

A

Adaptivität 110
Allgemeine Verbindung 239
Analysetools 156
Analyseverbindung 238
Animieren 157
Arbeitsumgebung
 GPS 1
 GAS 1
 Part Design 13
 Analysis Connection 236
 Generative Shape
 Design 13
 Advanced Meshing
 Tools 183
Auswertung 31

B

Balkenelemente 171
Bauteillagerung 41
Bauteilsymmetrien 70
Beam-Elemente 39
Belastung 27
Benutzerdefiniertes
 Material 260
Benutzerdefinierte Bedingung 257
Bericht 161
Beschleunigung 92
Bewegliche Verbindung 252
Bildlayout 160

D

Dehngrenze 38
Dichte 18
Dichte der Kraft 91
Drehpunkt 69
Druck 76

E

Ebenes Gleitlager 44
Elastizitätsmodul 17
ELFINI-Solver 38
Ergebnis 29
Erweiterte Bedingung 46
Erzwungene Verschiebung 95
Extremwerte 158

F

Federverbindung 247
Ferne Verbindung 250
Feste Einspannung 43
Finite Elemente 4
Fixierte Verbindung 244
Flächenkontakt 238
Flächenlast 88
Flächenloslager 44
Freie Frequenzanalyse 23
Frequenzanalyse 23

G

Gauß-Algorithmus 116
Genauigkeit 110
Gestaltungsenergiehypothese 149
Gleitdrehpunkt 68
Gleitmodul 261
Gleitverbindung 245
Globaler Sensor 166
Gradientenverfahren 116
Gruppieren 319

H

Hauptspannungen 147
Hexaeder-Elemente 198

I

Importierte Kraft 85
Importiertes Moment 87
Internet-Link 3
Isostatische Bedingung 50

K

Körperkraft 90
Kontaktverbindung 246
Koordinatensysteme 47
 Globales 48
 User 49
 Implizites 48
 Zylinder 49
 Kugel 50
Kugelgelenkverbindung 68

L

Lagerlast 84
Lokaler Sensor 167
Loslager 67

M

Massen 128
Materialbibliothek 13
Materialfamilie 15
Materialkatalog 18
Materialzuordnung 20
MKL-Library 317
Modellprüfprogramm 318

N

Nahtschweißverbindung 264
Netzdarstellung 139
Netz editieren 192
Normalspannungshypothese 149

O

Optimierung 323

P

Periodizitätsbedingung 71
Plausibilitätsprüfung 29
Poisson-Faktor 18
Presspassverbindung 248
Prozesse
 Statischer 117
 Frequenz 118
 Freier Frequenz 126
 Kombinierter 134
 Dynamische Antwort 137
Punktschweißverbindung 241

Index

Q

Querkontraktionsszahl 18

R

Randbedingungen 41

Reaktionssensor 165

Rotation 93

Rotatorisches Gleitlager 45

S

Schalenelemente 39

Schnittebenen 157

Schnittstellen 328

Schraubverbindung 249

Schubmodul 261

Schubspannungshypothese 149

Schweißnahtverbindung 242

Spannungen 34

Speichereinstellungen 37

Standardeinstellungen 34

Starre Verbindung 250

Statikanalyse 23

Strategien 114

Streckenlast 87

Streckgrenze 38

T

Temperaturfeld 98

Tetraeder-Elemente 40

V

Variantenvergleich 114

Verformungen 145

Vernetzung 30

Verschiebungsansatz 4

Verteilte Last 78

Viereckige Schalenelemente 183

Virtuelle Elemente 50

Starres 51

Bewegliches 53

Kontaktteil 53

Virtuelle Feder 64

Virtuelle Schraubverbindung 256

VonMises-Spannungen 140

W

Wärmeausdehnungskoeffizient 18