

## ISOMAG 2.0

T. Blochwitz, S. Bittner, U. Schreiber, A. Uhlig

**Forschung  
Projekt F 2311**

T. Blochwitz  
S. Bittner  
U. Schreiber  
A. Uhlig

**ISOMAG 2.0**

**Software für optimale Schwingungsisolierung  
von Maschinen und Geräten**

Dortmund/Berlin/Dresden 2013

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „ISOMAG 1.3 - Ergänzungen und Änderungen“ – Projekt F 2311 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dipl.-Ing. Torsten Blochwitz  
M. Sc. Stefan Bittner  
Dipl.-Ing. Uwe Schreiber  
Dr. Andreas Uhlig  
ITI Gesellschaft für ingenieurtechnische  
Informationsverarbeitung mbH  
Schweriner Straße 1, 01067 Dresden  
Telefon 0351 26050-0  
Fax 0351 26050-155  
info@iti.de  
www.iti.de

Titelbild: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund  
Telefon 0231 9071-0  
Fax 0231 9071-2454  
poststelle@buaa.bund.de  
www.buaa.de

Berlin:  
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin  
Telefon 030 51548-0  
Fax 030 51548-4170

Dresden:  
Fabricestr. 8, 01099 Dresden  
Telefon 0351 5639-50  
Fax 0351 5639-5210



Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.

[www.buaa.de/dok/4415100](http://www.buaa.de/dok/4415100)

## **Bemerkungen des Herausgebers**

### **Lizenzbestimmungen**

Das beiliegende Programm enthält eine Einzellizenz für einen Arbeitsplatz. Ein Programm als Einzellizenz darf im Netzwerk nicht verwendet werden.

Alle Teile der Dokumentation, der Daten sowie der Software unterliegen dem Urheberrecht. Alle Rechte sind geschützt. Jegliche Vervielfältigung oder Verbreitung, ganz oder teilweise, ist verboten. Kein Teil der Dokumentation oder Software darf kopiert, fototechnisch übertragen, reproduziert, übersetzt, auf einem anderen elektronischen Medium gespeichert oder in maschinell lesbare Form gebracht werden.

Ausdrücklich ausgenommen vom Urheberrecht und dem Verbot der Änderung ist die mit dem Programm installierte Datenbank isobank.sdf. Diese Datenbank enthält Daten von Schwingungsisolatoren nach Angaben der Hersteller. Sie kann von jedem Nutzer auf eigenes Risiko verändert und/oder ergänzt werden. Die Veröffentlichung oder die Weitergabe der Datenbank an Dritte bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung des Herausgebers.

### **Gewährleistung**

Alle Daten, Informationen, technischen Angaben und Programme sind nach bestem Wissen erstellt und mit größter Sorgfalt getestet worden. Trotzdem kann jedoch weder eine Garantie für absolute Fehlerfreiheit noch inhaltliche Richtigkeit gegeben werden.

Für technische Fehler, Probleme und inhaltlich fehlerhafte Angaben sowie deren Folgen wird keine Haftung übernommen. Aus diesem Grund müssen wir darauf hinweisen, dass etwaige Ersatzansprüche gleich welcher Art ausgeschlossen sind. Dies trifft insbesondere für die Nutzung der Isolatorendatenbank isobank.sdf zu (siehe auch nächste Seite). Bei Änderung der Datenbank isobank.sdf durch den Nutzer wird keine Garantie für eine korrekte Zusammenarbeit mit dem Programm ISOMAG gegeben.

Für aktuelle Informationen zum Programm sowie aktualisierte Versionen der Datenbank (siehe auch nächste Seite) besuchen Sie bitte die Website [www.baua.de/isomag](http://www.baua.de/isomag).

## **Datenbank isobank.sdf - Anwendungshinweise und Gewährleistungsausschluss -**

Die mit dem Programm ISOMAG installierte Datenbank isobank.sdf enthält mehr als 3500 Isolatoren von 20 Herstellern. Eine Auflistung der Hersteller befindet sich in .\ISOMAG\Documents\Herstell.pdf. Trotz der Bemühungen der BAuA um Vollständigkeit sind nicht alle Isolatoren-Hersteller vertreten. Es ist nicht das gesamte Produktionsprogramm der vorhandenen Hersteller enthalten. Die Datenbank enthält keine Angaben für besondere Eigenschaften des ausgewählten Isolators (z.B. Ölbeständigkeit, Verschmutzungsgefahr etc.).

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass mit der Aufnahme der Daten in die Datenbank keinerlei Wertung im Hinblick auf die Qualität der Produkte oder gar eine Empfehlung zum Kauf verbunden ist. Die Daten unterliegen nicht dem Änderungsdienst oder einer Überwachung durch den Hersteller.

Trotz aller Sorgfalt bei der Bearbeitung der Daten kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fehler bei der Datenübernahme bzw. -bearbeitung aufgetreten sind. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit des Programms und den Inhalt der Datenbank. Soweit Dritten aus deren Nutzung irgendein Schaden entsteht, ist jede Haftung sowohl gegenüber dem Herausgeber als auch gegenüber den Herstellern ausgeschlossen.

Es wird empfohlen, sich nach der Auswahl eines bestimmten Schwingungsisolators an den Hersteller direkt oder an ein Vertriebsbüro zur Verifizierung der Parameter oder der Eignung für spezielle Umgebungsbedingungen zu wenden. Dies gilt insbesondere bei Aufstellungen mit Eigenfrequenzen unter 10 Hz sowie bei hoch belasteten Isolatoren. Ansprechpartner sind in der Datei Herstell.pdf enthalten.

Für Verbesserungsvorschläge und Fehlerhinweise sind der Herausgeber und die Autoren dankbar. Ansprechpartner beim Herausgeber ist:

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Friedrich-Henkel-Weg 1–25, 44149 Dortmund  
Telefon 0231 9071-2071  
Fax 0231 9071-2070  
Info-zentrum@buaa.bund.de

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	8
Abstract	9
1	Einleitung 10
1.1	Begründung der Aufgabenstellung und Ziel des Forschungsvorhabens 10
1.2	Neu in ISOMAG 1.0 ..1.2 10
1.3	Neu in ISOMAG 2.0 11
1.4	Einordnung der Schwingungsisolierung in den Schwingungsschutz 12
1.5	Literaturlauswertung / Recherchen 13
2	Theoretische Grundlagen der Schwingungsisolierung 15
2.1	Minimalmodell des Einmassenschwingers 16
2.1.1	Gleichungen des krafterregten Schwingers 17
2.1.2	Gleichungen des stützerregten Schwingers 18
2.1.3	Vergrößerungsfunktion und Isolationsgrad 19
2.2	Minimalmodell des Zweimassenschwingers 21
2.2.1	Eigenfrequenzen des Zweimassenschwingers 22
2.3	Vergrößerungsfunktion und Isolationsgrad des Zweimassenschwingers 23
2.4	Das Blockfundament - der Schwinger mit 6 Freiheitsgraden 27
2.5	Doppelte Schwingungsisolierung im Raum – der Schwinger mit 12 Freiheitsgraden 29
2.6	Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften des Aufstellortes – der Schwinger mit 13 Freiheitsgraden 30
2.6.1	Grundlagen der Berücksichtigung des Aufstellortes 30
2.6.1.1	Ersatzparameter für den beidseitig gelenkig gelagerten Balken 31
2.6.1.2	Ersatzparameter für den beidseitig eingespannten Balken 34
2.6.1.3	Ersatzparameter für die allseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte 35
2.6.1.4	Ersatzparameter für die allseitig eingespannte Rechteckplatte 36
2.6.1.5	Ersatzparameter für die an gegenüberliegenden Seiten eingespannte bzw. gelenkig gelagerte Rechteckplatte 37
2.6.2	Struktur des Gesamtmodells 38
2.7	Umrechnung kontinuierlich verteilter Steifigkeiten auf diskrete Parameter 39
2.7.1	Eindimensionale Steifigkeiten 39
2.7.2	Baugründe 41
3	Grundlagen des Programms ISOMAG 44
3.1	Algorithmische Grundlagen des Programms 44
3.1.1	Koordinatensysteme 44
3.1.1.1	Globales Koordinatensystem (GK) 44
3.1.1.2	Maschinenkoordinatensystem (MK) und Fundamentkoordinatensystem (FK) 44
3.1.1.3	Schwerpunktkoordinatensystem (SK) 45

3.1.1.4	Trägheitshauptachsenkoordinatensystem (TK)	45
3.1.1.5	Hauptkoordinatensystem (HK)	45
3.1.1.6	Elementkoordinatensystem (EK)	45
3.1.1.7	Bezugskordinatensystem (BK)	46
3.1.2	Koordinatentransformationen	46
3.1.3	Berechnung der Trägheitseigenschaften	49
3.1.3.1	Berechnung der Elementträgheitsmatrizen	50
3.1.3.2	Aufstellen der Massenmatrix in Schwerpunktkoordinaten	50
3.1.3.3	Berechnung der Trägheitshauptachsen	51
3.1.4	Berechnung der Steifigkeitseigenschaften	52
3.1.4.1	Allgemeines zu den Steifigkeitsmatrizen	52
3.1.4.2	Aufstellen der Steifigkeitsmatrizen für die statische Rechnung	54
3.1.4.3	Wenn sich die Matrix nicht invertieren lässt...	54
3.1.4.4	Berechnung der Hauptverschiebesteifigkeiten sowie deren Lage und Richtung	55
3.1.4.5	Berechnung des Federungsmittelpunktes	56
3.1.4.6	Berechnung der Steifigkeitsmatrix für die dynamische Rechnung	56
3.1.5	Statik	57
3.1.6	Eigenfrequenzen und Schwingformen	57
3.1.7	Transformation auf Hauptkoordinaten	58
3.1.8	Berücksichtigung der Dämpfung	59
3.1.9	Frequenzgänge	60
3.1.9.1	Krafterregung	61
3.1.9.2	Stützerregung	63
3.1.9.3	Unwucherregung	63
3.1.10	Vergrößerungsfunktion	64
3.1.11	Zeitlösungen	64
3.1.11.1	Zeitlösungen für nichtharmonische Erregung	64
3.1.11.2	Zeitlösungen für harmonische Erregung	65
3.1.11.3	Unwucht	67
3.1.12	Auslegungsrechnung	67
3.1.12.1	Berechnung der erforderlichen Steife für die einfache Schwingungsisolierung	67
3.1.12.2	Steife und Fundamentmasse für die doppelte Schwingungsisolierung	69
3.2	Datenbankanbindung	70
3.2.1	Ziel und Anforderungen	70
3.2.2	Datenbankstruktur	70
4	Programmbeschreibung	73
4.1	Hard- und Software – Anforderungen	73
4.2	Leistungsumfang und Einsatzgebiet	73
4.2.1	Einschränkungen	75
4.2.1.1	Federn mit nichtlinearer Kraft-Weg Kennlinie	75
4.2.1.2	Große Verdrehungen	76
4.2.1.3	Impulse und andere nichtperiodische Erregungen	77
4.3	Allgemeiner Ablauf	78
4.4	Die Programmoberfläche	80
4.4.1	Arbeitsblatt	81
4.4.1.1	Die 2D Ansichten	81
4.4.1.2	Die 3D Ansicht	82

4.4.2	Objektleiste	82
4.4.3	Baumansicht	85
4.4.4	Menüleiste	85
4.4.4.1	Menü Datei	85
4.4.4.2	Menü Bearbeiten	85
4.4.4.3	Menü Berechnung	87
4.4.4.4	Menü Ergebnisse	87
4.4.4.5	Menü Ansicht	87
4.4.4.6	Menü Extras	87
4.4.4.7	Menü Fenster	89
4.4.5	Symbolleiste	89
4.4.6	Statusleiste	90
4.5	Der Modellaufbau	91
4.5.1	Erzeugen von Objekten	91
4.5.2	Markieren von Objekten	92
4.5.2.1	Markieren in einer der Modellansichten	92
4.5.2.2	Markieren in der Baumansicht	92
4.5.3	Parametrieren von Objekten	93
4.5.3.1	Allgemeine Eigenschaften	93
4.5.3.2	Lage	93
4.5.3.3	Abmessungen	94
4.5.3.4	Mehrfachparametrierung	95
4.5.4	Manipulieren von Objekten	96
4.5.4.1	Verschieben	96
4.5.4.2	Drehen	96
4.5.4.3	Bemaßung	97
4.5.4.4	Labels	97
4.5.5	Löschen von Objekten	97
4.5.6	Kopieren, Ausschneiden, Einfügen, Duplizieren von Objekten	98
4.5.7	Aktionen rückgängig machen und wiederherstellen	98
4.6	Beschreibung der Objekte	99
4.6.1	Maschine und Fundament	99
4.6.2	Körper	99
4.6.3	Erweiterte Körper	102
4.6.3.1	Freies Prisma	102
4.6.3.2	CAD Import	103
4.6.4	Isolatoren	105
4.6.4.1	Anordnung	106
4.6.4.2	Allgemeiner Parameterdialog	106
4.6.4.3	Parameterdialog Steife	107
4.6.4.4	Parameterdialog zur Beschreibung der Dämpfung	108
4.6.4.5	Parameterdialog zur Eingabe zulässiger Werte	109
4.6.4.6	Isolatorentabelle	110
4.6.5	Umgebung	111
4.6.6	Erregungen	112
4.6.6.1	Erdbebenanregung	114
4.6.6.2	Unwuchterregung	115
4.6.7	Punkte	115
4.7	Berechnung	116
4.7.1	Einstellungen	116



4.7.2	Auslegungsrechnung	118
4.7.2.1	Assistent für einfache Schwingungsisolierung	118
4.7.2.2	Assistent für doppelte Schwingungsisolierung	119
4.8	Ergebnisse	122
4.8.1	Statische Ergebnisse	123
4.8.1.1	Hauptträgheiten	123
4.8.1.2	Hauptsteifigkeiten	123
4.8.1.3	Statische Bestimmtheit und Einhaltung statischer Grenzwerte	124
4.8.1.4	Statische Verformungen und Kräfte	125
4.8.1.5	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen	126
4.8.2	Dynamische Ergebnisse	127
4.8.2.1	Darstellung über der Zeit	127
4.8.2.2	Darstellung über der Frequenz	129
4.8.3	Animation	131
4.8.4	Videoexport	133
4.9	Dokumentation	134
4.10	Nützliche Hinweise/Troubleshooting	135
5	Spezielle Programmmodule	137
5.1	Auswahl von Isolatoren und Suche in der Datenbank	137
5.2	Kraft-Verformungs-Kennlinie	139
5.3	Ergebnisfenster	143
5.3.1	Menü und Schaltflächen	145
5.3.1.1	Dateimenü	145
5.3.1.2	Menü Bearbeiten	145
5.3.1.3	Menü Darstellung	146
5.3.2	Anpassung der Eigenschaften	147
5.3.2.1	Fenstereigenschaften	147
5.3.2.2	Eigenschaften der Achsdarstellung	148
5.3.2.3	Eigenschaften der Kurvendarstellung	150
5.3.3	Weitere Funktionen	152
5.3.3.1	Aktueller Verlauf	152
5.3.3.2	Kurvenverlauf umbenennen	153
5.3.3.3	Maßeinheiten ändern	153
5.3.3.4	Ausmessen von Kurven	153
5.3.3.5	Darstellung zoomen	155
5.3.3.6	Drag&Drop für Ergebnisse	155
5.4	Druck-Designer	156
5.4.1	Übersicht	156
5.4.1.1	Dokumentorganisation und Explorer	157
5.4.2	Objekttypen und deren Manipulierung	158
5.4.2.1	Grafiken	158
5.4.2.2	Parameter	159
5.4.2.3	Tabellen	159
5.4.2.4	Texte	159
5.4.2.5	Sonstiges	159
5.4.3	Objekteigenschaften	160
5.4.4	Zur Bedienung	161
5.4.4.1	Verschieben	161
5.4.4.2	Skalieren	162

5.4.4.3	Blättern und Zoomen	162
5.4.4.4	Bereich wählen	162
5.4.4.5	Formatieren	163
5.4.4.6	Sonstiges	163
5.4.5	Ein individuelles Template	164
6	Literaturverzeichnis	166
7	Anhang	173
7.1	Syntax für alphanumerische Eingaben	173
7.1.1	Erläuterung zur Notation	173
7.1.2	Mathematische Ausdrücke	174
7.1.3	Beispiele	175
7.2	Abbildungen	176
7.3	Tabellen	183
7.3.1	Trägheitseigenschaften der Grundkörper	183
7.3.2	Menübefehle	184
7.3.3	Schaltflächen	187
7.4	Beispiele	189
7.4.1	Beispiel Zentrifuge.isg	189
7.4.2	Beispiel Ventilator.isg	197
7.4.3	Beispiel Ventilator 2.isg	200
7.4.4	Beispiel Baugrund.isg	202

# ISOMAG 2.0 – Software für optimale Schwingungs- isolierung von Maschinen und Geräten

## Kurzreferat

Von Maschinen ausgehende Schwingungen können sich negativ auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen auswirken. Außerdem stellen Schwingungen für Geräte, Gebäude und Anlagen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Die Wirkung von Schwingungen auf den Menschen in vertretbaren Grenzen zu halten sowie empfindliche Geräte und sicherheitstechnische Anlagen vor Überlastung bzw. Schäden oder Ausfall infolge zu hoher Schwingungsbeanspruchungen zu schützen, sind wichtige Aufgaben der Schwingungsisolierung.

Im Forschungsvorhaben entstand die Software **ISOMAG**, eine Weiterentwicklung von **ITI-ISO** (Fb 769). Grafik und Bedienkomfort wurden wesentlich verbessert. Neben der einfachen sind jetzt auch Auslegung und Nachrechnung der doppelten Schwingungsisolierung sowie die Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften des Aufstellorts möglich. Hauptanwendungsgebiet des Programms sind Auslegung und Optimierung der schwingungs isolierten Aufstellung von Maschinen und Geräten (sekundärer Schwingungsschutz).

Die Programmbedienung, Modellbeschreibung sowie die Datenein- und -ausgabe erfolgen grafisch interaktiv. Eine Datenbankanbindung ermöglicht die schnelle und sichere Übernahme der Kenngrößen der Schwingungsisolatoren. Das Programm unterstützt den Anwender bei der Auswahl und Anordnung von Schwingungsisolatoren. Es berechnet die für die Beurteilung relevanten Größen wie Eigenfrequenzen, Kräfte, Schwingwege, Schwinggeschwindigkeiten und Schwingbeschleunigungen sowie Vergrößerungsfunktionen. Die Einhaltung von Grenzwerten wird überwacht. Der Anwender erhält aussagefähige Ergebnisse, bei geringstem Aufwand bezüglich Einarbeitung und Modellbeschreibung.

## Schlagwörter:

einfache und doppelte Schwingungsisolierung, isolierte Aufstellung von Maschinen und Geräten, Blockfundament, starre Maschine, elastisch gestützte starre Körper

# **ISOMAG 2.0 – Software for Optimal Vibration Isolation of Machines and Devices**

## **Abstract**

Vibrations emanating from machines can be detrimental to human health and well-being. Aside from that, vibrations increase safety hazards in machinery, buildings and installations. The primary goals of vibration isolation are to restrict the effects of vibrations on people to within reasonable limits and to protect sensitive apparatus and safety systems from becoming overloaded or suffering damage or breakdown caused by excessive stress from vibrations.

Software **ISOMAG**, a further development of **ITI-ISO** (Fb 769) was created in research plan. Graphics and operation were improved considerably. Besides the single vibration isolation, interpretation and calculation of double one as well as consideration of dynamic properties of the position are now also possible. The main purpose of the program is to design and optimize vibration isolation in machine and apparatus setups (secondary vibration protection).

Interactive graphics are used in the program operation, model description, and data input and output. Linkage to a database permits rapid and certain acceptance of the characteristic quantities of the vibration isolators. The program supports the user in making a suitable selection and arrangement of vibration isolators. It calculates the quantities that are relevant for the evaluation – quantities such as characteristic frequencies; forces; mode shapes, velocities and accelerations; as well as transmissibilities. It also monitors the observance of limit values. The user receives meaningful results with the lowest possible expenditure of preparatory work and model description.

## **Key words:**

single and double vibration isolation, isolation in machines and apparatus setups, block foundation, rigid machine, elastically supported rigid body

# 1 Einleitung

## 1.1 Begründung der Aufgabenstellung und Ziel des Forschungsvorhabens

Einerseits können sich Schwingungen negativ auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen auswirken. Die Verminderung der Schwingungsexposition für Personen, deren Arbeitsplatz sich in der Nachbarschaft von Maschinen mit hoher Schwingungsemission befindet, ist daher von zentraler Bedeutung.

Andererseits stellen Schwingungen für Maschinen, Gebäude und Anlagen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Es ist eine weitere wichtige Aufgabe der Schwingungsisolierung, dieses Risiko zu minimieren, empfindliche Geräte und sicherheitstechnische Anlagen vor Überlastung bzw. Schäden oder Ausfall infolge zu hoher Schwingungsbeanspruchungen zu schützen,.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, ein unter Windows lauffähiges, anwenderfreundliches Rechenprogramm für PC-Technik zu entwickeln. Das Programm dient der Auslegung und Optimierung der Schwingungsisolierung von Maschinen und Geräten (sekundärer Schwingungsschutz).

Weitgehend selbsterklärende Bedienerführung und übersichtliche Handhabung zeichnen die Software aus. Die Programmbedienung, Modellbeschreibung sowie die Datenein- und -ausgabe erfolgen grafisch-interaktiv. Eine Datenbankanbindung ermöglicht die schnelle und sichere Übernahme der Kenngrößen der Schwingungsisolatoren. Somit erhält der Anwender aussagefähige Ergebnisse - bei geringstem Aufwand hinsichtlich Einarbeitung und Modellbeschreibung.

Das Programm unterstützt den Anwender bei der Auswahl und Anordnung von Schwingungsisolatoren. Es berechnet die für die Beurteilung relevanten Größen wie Kräfte, Schwingwege, Schwinggeschwindigkeiten und Schwingbeschleunigungen. Die Einhaltung von Grenzwerten (zulässige Belastungen und Verformungen) wird geprüft. Die Darstellung der erreichten Isolierwirkung erfolgt grafisch. Alle Eingabe- und Ergebnisgrößen lassen sich in übersichtlicher Form drucken, d. h. als Grafiken, Text oder Tabellen.

Aufgabe des jetzigen Forschungsthemas ist die Weiterentwicklung der Software, um deren Einsatzgebiet zu erweitern und den Bedienkomfort weiter zu verbessern. Somit stellt der vorliegende Forschungsbericht eine Weiterentwicklung und Überarbeitung des Forschungsberichtes [1] dar. Der folgende Abschnitt 1.4 fasst die Schwerpunkte zusammen.

## 1.2 Neu in ISOMAG 1.0 ..1.2

Das Programm **ISOMAG** ist eine Weiterentwicklung des Programms **ITI<sup>®</sup>-ISO**. Mit der Umstellung auf die 32-bit-Technologie werden Vorteile wie moderne Werkzeuge für Modellerstellung, Modellbearbeitung oder Datenaustausch, erweiterte Bedien-

möglichkeiten, verbesserte Grafik, neue Darstellungsmöglichkeiten für Modelle und Ergebnisse sowie schnellere und stabilere Abarbeitung nutzbar.

Es können zwei starre Körper beschrieben und berücksichtigt werden, die untereinander und/oder mit der Umgebung elastisch verbunden sind. Damit ist die doppelte Schwingungsisolierung berechenbar. Auch für die doppelte Schwingungsisolierung werden eine Nachrechnung und eine Auslegungsrechnung angeboten. Ein Assistent unterstützt den Anwender bei der Dimensionierung des Fundamentes und bei der Auswahl geeigneter Isolatoren. Man kann mit der einfachen Schwingungsisolierung beginnen und später zur doppelten übergehen. Vergleichsrechnungen zwischen einfacher und doppelter Schwingungsisolierung sind ebenfalls möglich.

Auch die dynamischen Eigenschaften der Umgebung können in **ISOMAG** berücksichtigt werden. Für den Aufstellungsort der Maschine lassen sich die Ersatzparameter (Masse und Frequenz oder Steifigkeit von z. B. Gebäudedecken) direkt eingeben oder für Balken sowie Platten berechnen.

Die numerische Eingabe wurde verbessert, z. B. bei der Lage von Schräglagern. Die Drehwinkel zur Beschreibung der Lage können jetzt in beliebiger Reihenfolge eingegeben werden.

In **ISOMAG** wird durchgängig mit Maßeinheiten gearbeitet. Diese können für die Ein- und Ausgabe gewählt und umgestellt werden. Wenn Maßeinheiten geändert werden, erfolgt eine entsprechende Umrechnung der Werte.

Für Unwuchterregung werden neben den Zeitlösungen jetzt auch Amplitudengänge und Vergrößerungsfunktionen über der Frequenz berechnet.

Die Stützererregung kann beliebige Richtungen haben. Damit sind beispielsweise auch schräge oder seitliche bzw. horizontale Stützererregungen modellierbar.

Neu sind auch die Bemaßungsroutinen für Darstellung und Druck. Damit lassen sich beispielsweise Abstände beim Modellaufbau kontrollieren oder bemaßte Darstellungen, die Informationen zu Lage und Anordnung der Isolatoren oder zu den Abmaßen des Fundamentes enthalten, ausgeben bzw. drucken.

An Ergebnisgrößen sind u. a. die auf den Boden wirkenden Restkräfte sowie die Vergrößerungsfunktionen bei Unwuchterregung hinzugekommen.

### 1.3 Neu in ISOMAG 2.0

**ISOMAG 2.0** erweitert den Elementumfang, vereinfacht die Bedienung und stellt die Lauffähigkeit des Programms auf zeitgemäßen Windows Versionen (XP, Vista, Windows 7 und 8) sicher. Außerdem wurde die Isolatorendatenbank auf das zukunftssichere SQL Format umgestellt.

Über den **CAD Import** kann die Geometrie von Maschinenelementen aus CAD Systemen in eingelesen werden. Mit STL wird ein Low-Level CAD Format unterstützt,

das von allen verbreiteten CAD Systemen generiert werden kann. Die Trägheitsdaten werden dabei automatisch berechnet, sind aber auch von Hand veränderbar.

Als neue Körper stehen **Prismen** mit frei definierbarer Grundfläche zur Verfügung. Das erleichtert die Nachbildung von profilartigen Körpern. Auch hier werden die Trägheiten aus der Geometrie berechnet.

Die Eigenschaften der Isolatoren können jetzt auch übersichtlich in **Tabellenform** editiert werden. **Defaultwerte** für neue Isolatoren können hinterlegt werden.

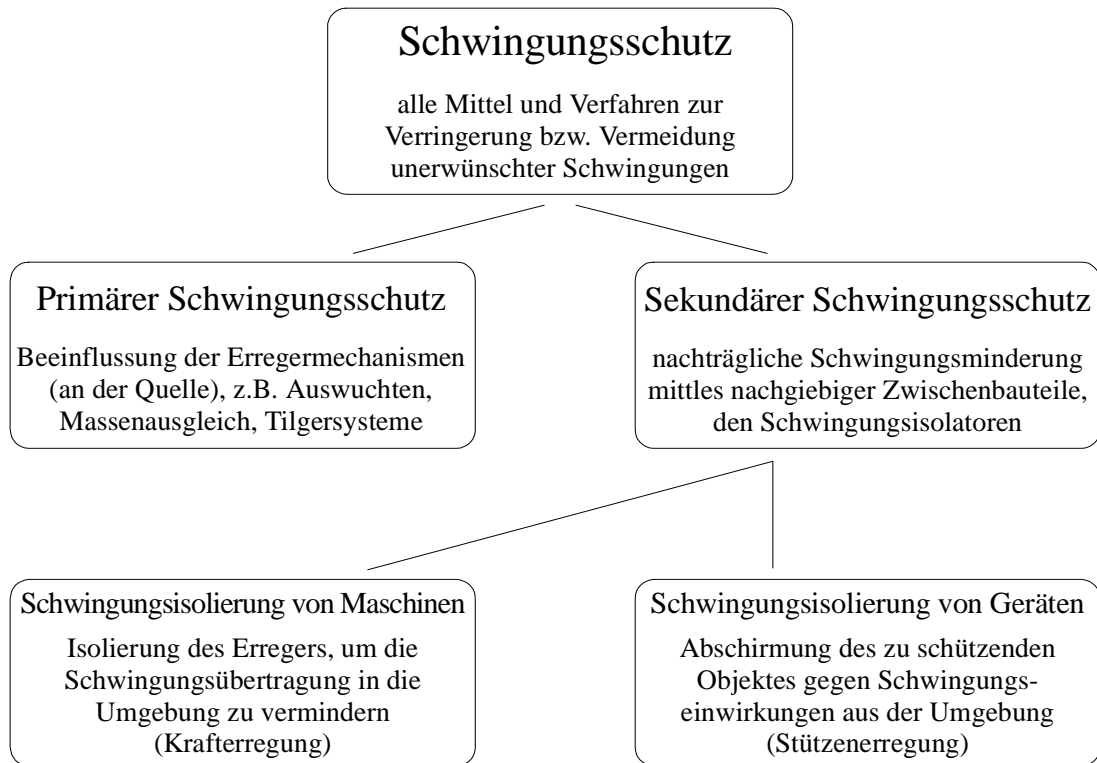
Die Animationsfunktion (Eigenschwingformen, Betriebsschwingform) ist erweitert worden. Die **Animation** kann als **Video Datei** in verschiedenen Formaten exportiert werden. Animationsgeschwindigkeit und Ausschnitt sind frei wählbar.

Die **Ergebnisfenster** und ihre Einstellungen werden mit im **ISOMAG** Modell **gespeichert** und beim Einlesen **wiederhergestellt**.

Über die **Undo/Redo** Funktion können unbeabsichtigte Änderungen zurückgenommen werden.

## 1.4 Einordnung der Schwingungsisolierung in den Schwingungsschutz

Nach [2] versteht man unter Schwingungsschutz bzw. Schwingungsabwehr alle Maßnahmen, die geeignet sind, unerwünschte, zeitlich veränderliche Kräfte oder Bewegungen zu verkleinern oder zu eliminieren. Folgende Grafik ordnet die Schwingungsisolierung in den Schwingungsschutz ein:



**Abb. 1.1** Einordnung der Schwingungsisolierung in den Schwingungsschutz

Ziel der Schwingungsisolierung ist es, das zu schützende Objekt mittels nachgiebiger Zwischenbauteile, den Isolierelementen, möglichst weitgehend vom Erreger mechanisch abzuschirmen. Neben den Isolatoren können auch Zusatzmassen wie Fundamente zum Einsatz kommen. Man unterscheidet dabei zwischen Schwingungsisolierung von Maschinen und Schwingungsisolierung von Geräten (vgl. **Abb. 1.1**).

## 1.5 Literaturlauswertung/Recherchen

Recherchen im Vorfeld von **ITI<sup>®</sup>-ISO** hatten ergeben, dass keine allgemein zugänglichen Software-Lösungen nachweisbar sind, die auf heute zur Verfügung stehender PC-Technik laufen bzw. die den heute gestellten Anforderungen an moderne Software gerecht werden. Das inzwischen nicht mehr angebotene Programm **AUTRA [6]** konnte jedoch als Orientierung für den erforderlichen Umfang an Berechnungen angesehen werden.

Die Aufgaben und Ziele der Schwingungsisolierung sowie deren theoretische Grundlagen sind schon lange Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen und in der Literatur allgemein bekannt. Theoretische und praktische Fragen der Maschinenfundamentierung werden beispielsweise in **[7]** oder **[8]** ausführlich behandelt. **[10]** ist als umfassende Arbeit zur Dynamik ebener Blockfundamente zu nennen. Fragen der Strukturmechanik und Ansätze zur Berücksichtigung der Dämpfung werden in **[11]** und **[12]** diskutiert. Ausführungen zu Anforderungen an Software für die lineare Strukturanalyse hinsichtlich Modellierung, Systemaufbau und Ergebnisdarstellung findet man in **[13]**.



Außerdem wurden verschiedene Normen und Richtlinien in Bearbeitung des Themas ausgewertet. Eine umfassende Zusammenstellung und Gliederung aller mit mechanischen Schwingungen in Zusammenhang stehenden Vorschriften, Normen und Richtlinien stellt [14] dar. In [2] werden grundlegende Begriffe wie System, Kennwerte, Erregung und Antwort erläutert. Das Gebiet der Schwingungsisolierung wird definiert und abgegrenzt. In [3] und [4] findet man Beurteilungs- bzw. Bewertungsmaßstäbe. Mit Begriffen und Einteilung von Schwingungen bzw. schwingungsfähigen Systemen beschäftigt sich [15]. Schwingungen werden hinsichtlich ihrer zeitlichen Verläufe und ihrer Entstehung eingeteilt. Die Methoden der harmonischen Analyse und der Fourier-Transformation sowie die Bildung von Bewertungsgrößen wie Mittelwerten oder Leistungsdichten werden erläutert. Begriffe wie System, Koordinaten, Zustandsgrößen, Eigenwerte, Modalmatrix oder Frequenzgang sind in [16] definiert. In [17] findet man weitere Definitionen wie die der statischen und dynamischen Lasten, Allgemeines zu Modellbildung und Berechnung sowie Richtwerte für die mit der Fundamentierung bzw. Aufstellung der Maschine anzustrebenden Abstimmverhältnisse. Außerdem ist dort festgehalten, welche Angaben von den Isolatoren- sowie Maschinenherstellern zwecks Fundamentierung verbindlich zu machen sind. Schließlich sind in der Euro-Norm [18] die wesentlichen Punkte zur Schwingungsisolierung zusammengestellt. Man kann diese Norm als Zusammenfassung und Präzisierung der zuvor zitierten Normen und Richtlinien betrachten.

Um an die derzeit üblichen Methoden der Schwingungsisolierung anknüpfen zu können, wurden die Kataloge verschiedener Hersteller analysiert (z. B. [19] bis [23]). Die Auswertung der Kataloge erfolgte hinsichtlich der für die Schwingungsisolatoren vom Hersteller angegebenen Parameter sowie bezüglich der vorgegebenen Berechnungs- und Auswahlmethoden.

## 2 Theoretische Grundlagen der Schwingungs- isolierung

In Abschnitt 1.4 wurde die Schwingungsisolierung in den Schwingungsschutz eingeordnet. Ihre Aufgabe besteht nach [2] darin, durch den Einbau von federnden und ggf. auch dämpfenden Bauelementen - den Isolatoren - die Übertragung von schwingenden Kräften zu vermindern. In der Maschinendynamik zählt die Aufstellung von Maschinen zu den wichtigsten Aufgaben [7].

Die Problematik der Maschinenaufstellung ist sowohl für Hersteller und Projektanten wie für Betreiber von Interesse. Mit der elastisch aufgestellten Maschine ergibt sich ein schwingungsfähiges System, dessen Eigenschaften bekannt sein müssen. Durch Variation von Steifigkeits- und Trägheitseigenschaften lassen sich die Eigenfrequenzen dieses Systems gezielt beeinflussen. Während die Aufstellelemente Einfluss auf die Steifigkeit nehmen, lassen sich die Trägheitseigenschaften über Fundamente beeinflussen. Angestrebt wird dabei eine Aufstellung, bei der nur eine geringe (ideal: keine) dynamische Wechselwirkung zwischen aufgestelltem Objekt und Aufstellungsort auftritt. Sowohl die dynamischen Kräfte als auch die auftretenden Bewegungen sind in gewissen Grenzen zu halten.

Die dynamischen Wechselwirkungen werden durch geeignete Abstimmung der Eigenfrequenzen des aufgestellten Objektes gegenüber den Erregerfrequenzen beeinflusst. Man unterscheidet:

- die **tiefe Abstimmung**, bei der die höchste Eigenfrequenz kleiner als die niedrigste Erregerfrequenz ist,
- die **hohe Abstimmung**, bei der die Eigenfrequenzen über dem Spektrum der Erregerfrequenzen liegen und
- die **gemischte Abstimmung**, bei der sich die Spektren der Eigen- und Erregerfrequenzen überschneiden; jedoch so, dass keine Resonanzen auftreten.

In der Praxis kommen alle Abstimmungsarten zum Einsatz. Ziel der Schwingungsisolierung ist es, dass die Antwortamplituden kleiner als die Erregeramplituden werden. Dies ist für die tiefe und teilweise für die gemischte Abstimmung möglich. Für die hohe Abstimmung und auch zum Teil für die gemischte Abstimmung sind die Antwortamplituden größer als die Erregeramplituden. Scheidet eine Änderung der Abstimmungsart aus, können in diesen Bereichen die Amplituden nur durch eine größere Dämpfung verringert werden. Man spricht dann auch von Schwingungsdämpfung.

Die genaue Kenntnis der Erreger- und Eigenfrequenzen ist jedoch in jedem Fall Voraussetzung für eine erfolgreiche Abstimmung. Während die Erregungen meist bekannt und vorgegeben sind, müssen sich die Eigenfrequenzen aus den Steifigkeits- und Trägheitsverhältnissen berechnet werden.

Im Folgenden wird die Aufstellung der starren Maschine betrachtet. Das bedeutet, dass die niedrigste Eigenfrequenz des aufzustellenden Objektes (einschließlich eines eventuell starr angekoppelten Fundamentes) hoch gegenüber der höchsten Eigenfrequenz des elastisch aufgestellten Objektes ist. In diesem Fall kann die Einheit aus Maschinen und Fundament als starr angenommen werden. Da ein starrer Körper im

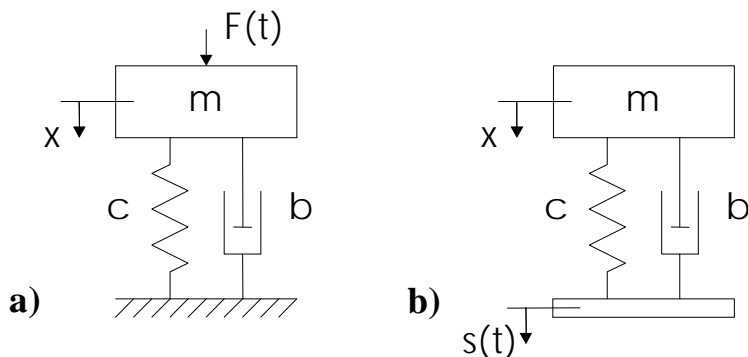
Raum 6 Freiheitsgrade hat, ergibt sich ein Modell mit 6 Freiheitsgraden. In diesem Modell ist das Minimalmodell des Schwingers mit einem Freiheitsgrad, welches viele Hersteller von Isolierelementen zu deren Auswahl benutzen (z. B. [20] oder [23]), als Sonderfall enthalten.

Stellt man die starre Maschine elastisch auf ein elastisch gegenüber der Umgebung gelagertes Fundament (weiterer Starrkörper), so spricht man von der doppelten Schwingungsisolierung. Das Modell verfügt dann über zwei starre Körper und hat somit 12 Freiheitsgrade.

Zusätzlich lassen sich noch die dynamischen Eigenschaften (Masse und Steifigkeit) der Umgebung bzw. des Aufstellortes berücksichtigen. Da hier im Allgemeinen die Berücksichtigung in Schwerkraftichtung ausreichend ist, erhöht sich die Zahl der Freiheitsgrade um eins auf 13.

## 2.1 Minimalmodell des Einmassenschwingers

Der Schwinger mit einem Freiheitsgrad eignet sich gut für die Klärung prinzipieller Fragen der Schwingungsisolierung von Maschinen und Geräten sowie für die Vorauswahl von Schwingungsisolatoren. Die für ihn abgeleiteten Formeln können außerdem angewendet werden, wenn man Modelle mit mehreren Freiheitsgraden auf so genannte Hauptkoordinaten transformiert. Man erhält dann statt eines gekoppelten Gleichungssystems  $n$  (entkoppelte) Gleichungen für Einmassenschwinger.



**Abb. 2.1** Minimalmodelle für die Schwingungsisolierung, Einmassenschwinger  
 a) Krafterregung für die Schwingungsisolierung von Maschinen  
 b) Weg- bzw. Stützerregung für die Schwingungsisolierung von Geräten

Im Zusammenhang mit der Schwingungsisolierung sind zwei Minimalmodelle von Interesse: Der krafterregte und der wegerregte Schwinger mit einem Freiheitsgrad (vgl. **Abb. 2.1**).  $F(t)$  ist die zeitabhängige Krafterregung, während  $s(t)$  die zeitabhängige Wegerregung oder Stützerregung symbolisiert. Die Koordinate  $x$  beschreibt die Bewegung des Schwingers. Dessen Parameter Masse, Dämpfung und Steife sind mit  $m$ ,  $b$  und  $c$  bezeichnet.

Um die Umgebung vor Kräften zu schützen, die von der Maschine ausgehen, kommt Modell a) zur Anwendung. Möglichst wenig der von der Maschine erzeugten Kraft soll über die Aufstellung in die Umgebung geleitet werden. Modell b) wird verwendet, wenn ein empfindliches Gerät vor den Bewegungen der Umgebung geschützt werden soll. Die Bewegungsamplituden des aufgestellten Objektes dürfen nur einen Bruchteil der Bewegungsamplituden des Aufstellortes betragen. Einmal soll also die Übertragung einer Kraft, das andere Mal die Übertragung einer Wegamplitude vermindert werden. Die Lösung beider Probleme führt zu den gleichen Ergebnissen, so dass sie hier gemeinsam behandelt werden können.

### 2.1.1 Gleichungen des krafterregten Schwingers

Die Bewegungsgleichung des krafterregten Schwingers mit einem Freiheitsgrad lautet:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F(t) . \quad (2.1)$$

Bei harmonischer Erregung kann für die Kraft F geschrieben werden:

$$F = F(t) = \hat{F} \sin(\Omega t) . \quad (2.2)$$

$\hat{F}$  ist dabei die Amplitude der Kraft,  $\Omega$  die Kreisfrequenz ihrer zeitlichen Änderung. Zur Lösung ist nach [7] der Übergang auf komplexe Größen sinnvoll. Sie werden im Folgenden mit „ $\tilde{\phantom{x}}$ “ gekennzeichnet. Mit der Eulerschen Zahl e und der imaginären Einheit j setzt man also

$$F = \hat{F} \cdot e^{j(\Omega t + \varphi)} = \hat{F} \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j(\Omega t)} = \tilde{F} \cdot e^{j\Omega t} . \quad (2.3)$$

Die Formel (2.2) ist in (2.3) als Imaginärteil enthalten. Die Einführung des Winkels  $\varphi$  ermöglicht die Berücksichtigung verschiedener Phasenlagen sowie die phasengerechte Überlagerung der Ergebnisgrößen. Für die Schwingungsisolierung ist der eingeschwingene bzw. stationäre Zustand, bei dem die Schwingung in der Erregerfrequenz erfolgt, von Interesse. Deshalb wird für x ein analoger Ansatz gewählt:

$$x = \tilde{x} \cdot e^{j\Omega t} . \quad (2.4)$$

Zweimaliges Differenzieren von (2.4) nach der Zeit

$$\dot{x} = j\Omega \tilde{x} \cdot e^{j\Omega t} = \dot{\tilde{x}} \cdot e^{j\Omega t} \quad (2.5)$$

$$\ddot{x} = -\Omega^2 \tilde{x} \cdot e^{j\Omega t} = \ddot{\tilde{x}} \cdot e^{j\Omega t} \quad (2.6)$$

und Einsetzen in (2.1) liefert:

$$-m\Omega^2 \tilde{x} e^{j\Omega t} + bj\Omega \tilde{x} e^{j\Omega t} + c\tilde{x} e^{j\Omega t} = \tilde{F} e^{j\Omega t} \quad \text{bzw.}$$

$$\tilde{x}(c - m\Omega^2 + jb\Omega) = \tilde{F} \quad (2.7)$$

Mit den Abkürzungen  $\omega$  für die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems,  $\eta$  für das Frequenzverhältnis und  $D$  für den Dämpfungsgrad

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{m}{c}, \quad \eta = \frac{\Omega}{\omega} \quad \text{und} \quad D = \frac{b}{2\sqrt{cm}} \quad (2.8)$$

erhält man nach einigen Umformungen

$$\tilde{x} = \frac{\tilde{F}}{c} \left[ \frac{1 - \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} - j \frac{2D\eta}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} \right]. \quad (2.9)$$

Mit  $\dot{x} = j\Omega\tilde{x} \cdot e^{j\Omega t}$  ergibt sich für die Geschwindigkeit:

$$\dot{\tilde{x}} = j\Omega \frac{\tilde{F}}{c} \left[ \frac{1 - \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} - j \frac{2D\eta}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} \right]. \quad (2.10)$$

Die gesuchte, auf den Boden wirkende Kraft  $F_B$  ist (aus Gleichgewichtsgründen) gleich der Summe der Kräfte in Feder und Dämpfer:

$$F_B = cx + b\dot{x}, \quad \text{bzw. in komplexer Schreibweise}$$

$$\tilde{F}_B = c\tilde{x} + b\dot{\tilde{x}}. \quad (2.11)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (2.9) und (2.10) in (2.11) und der Bezug auf die Erregung liefern schließlich:

$$\frac{\tilde{F}_B}{\tilde{F}} = \left[ \frac{1 - \eta^2 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} - j \frac{2D\eta^3}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} \right]. \quad (2.12)$$

Bildet man den Betrag der komplexen Größe (2.12), erhält man die für die Schwingungsisolierung wichtige Vergrößerungsfunktion (vgl. Abschnitt 2.1.3).

## 2.1.2 Gleichungen des stützerregten Schwingers

Für den stützerregten Schwinger lässt sich die Bewegungsgleichung wie folgt schreiben:

$$m\ddot{x} + b(\dot{x} - \dot{s}) + c(x - s) = 0. \quad (2.13)$$

Während man für  $x$  den bereits in **(2.4)** eingeführten Ansatz benutzt, wählt man für die harmonische Erregung  $s$  analog:

$$s = \tilde{s} \cdot e^{j\Omega t} . \quad (2.14)$$

Das Einsetzen von **(2.4)** und sowie deren Ableitungen nach der Zeit in **(2.13)** liefern:

$$\tilde{x}(c - \Omega^2 m + jb\Omega) = (c + jb\Omega)\tilde{s} . \quad (2.15)$$

Nach einigen Umformungen und unter Verwendung der Abkürzungen **(2.8)** ergibt sich für die auf die harmonische Erregung bezogene stationäre Bewegung des Schwingers:

$$\frac{\tilde{x}}{\tilde{s}} = \left[ \frac{1 - \eta^2 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} - j \frac{2D\eta^3}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} \right] . \quad (2.16)$$

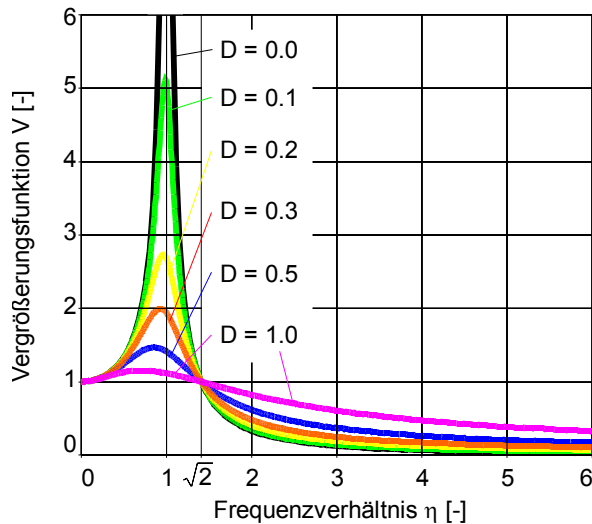
Die rechte Seite der Gleichung **(2.16)** ist mit der von **(2.12)** identisch. Man erhält also für die Stützerregung die gleiche Vergrößerungsfunktion wie für die Krafterregung (vgl. Abschnitt **2.1.3**).

### 2.1.3 Vergrößerungsfunktion und Isolationsgrad

Bildet man den Betrag der komplexen Größen **(2.12)** oder **(2.16)**, erhält man die so genannte Vergrößerungsfunktion oder Aufschaukelung  $V$ :

$$V = \frac{\sqrt{1 + 4D^2\eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \quad (2.17)$$

Trägt man die Vergrößerungsfunktion  $V$  über dem Frequenzverhältnis  $\eta$  mit Dämpfungsmaß  $D$  als Parameter auf, ergibt sich folgende, allgemein bekannte Darstellung:



**Abb. 2.2** Die Vergrößerungsfunktion in Abhängigkeit von Frequenzverhältnis und Dämpfung

Mit der Vergrößerungsfunktion gemäß **Abb. 2.2** ist also das Verhältnis der Schwingamplituden zu den Erregeramplituden aufgetragen. Diese Vergrößerungsfunktion des eingeschwingenen Zustandes gilt für harmonische Kraft- und Wegerregung gleichermaßen.

Unabhängig von der Dämpfung bzw. dem Dämpfungsmaß  $D$  verlaufen alle Kurven durch die Punkte  $(0, 1)$  und  $(\sqrt{2}, 1)$ . Im Punkt  $(0, 1)$  ist die Erregerdrehzahl gleich Null. Die Schwingamplitude ist gleich der Erregeramplitude (statischer Wert). Bis zum Punkt  $(\sqrt{2}, 1)$  ist die Schwingamplitude größer als die Erregeramplitude, d. h. es tritt eine Überhöhung auf. Erst wenn das Frequenzverhältnis den Wert  $\sqrt{2}$  übersteigt, werden die Schwingamplituden kleiner als die Erregeramplituden. Es tritt die gewünschte Isolierwirkung ein. Deshalb wird für die Schwingungsisolierung die tiefe Abstimmung mit einem Frequenzverhältnis größer  $\sqrt{2}$  angestrebt.

Aus **Abb. 2.2** wird auch ersichtlich, dass zu starke Dämpfung die Isolierwirkung mindert: Für Frequenzverhältnisse größer steigen die Schwingungsamplituden mit steigendem Dämpfungsgrad. Bezüglich der Schwingungsisolierung sollte also auf Dämpfung verzichtet werden. Oft ist dies aber nicht oder nur begrenzt möglich, da bei Anfahrvorgängen bzw. beim Hochlaufen der Maschinen im Falle tiefer Abstimmung die Resonanzstelle ( $\eta = 1$ ) durchlaufen werden muss. In der Resonanz begrenzt die Dämpfung die Schwingamplituden: Je größer die Dämpfung, desto kleiner die Amplituden.

Ebenfalls aus **Abb. 2.2** ergibt sich, dass bei schwacher Dämpfung außerhalb der Resonanz dämpfungsfrei gerechnet werden kann: Die Kurven für  $D = 0.0$  und  $D = 0.1$  sind in diesen Bereichen praktisch identisch.

Schließlich zeigt **Abb. 2.2** auch, dass praktische Frequenzverhältnisse zwischen 2 und 4 liegen sollten. Größere Abstimmverhältnisse verbessern die Isolierwirkung nicht wesentlich, sind aber oft mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden.

Ein Maß für die Verringerung der Schwingungen und damit für die Güte der Schwingungsisolierung ist der Isolationsgrad  $i$ . Er ist für Bereiche der Schwingungsisolierung definiert, also für Bereiche, in denen die Vergrößerungsfunktion kleiner (oder höchstens gleich) 1 ist. Er gibt an, um wie viel Prozent die Schwingamplituden den Betrag der Erregeramplituden unterschreiten. Für den Schwinger mit einem Freiheitsgrad berechnet er sich wie folgt:

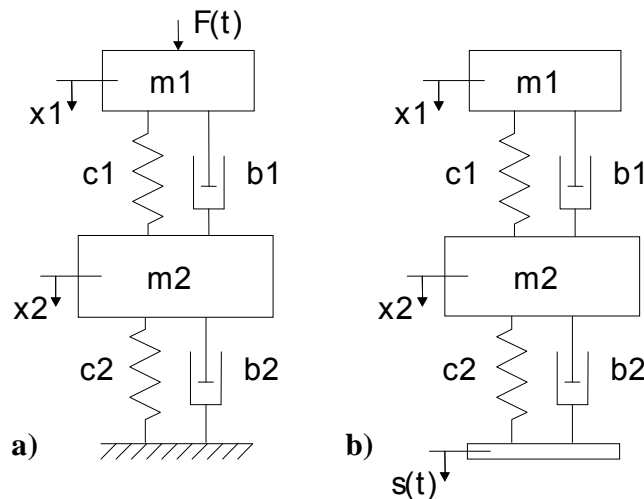
$$i = \left( 1 - \frac{\sqrt{1 + 4D^2\eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \right) \cdot 100 \% . \quad (2.18)$$

Unter Vernachlässigung der Dämpfung geht Gleichung (2.18) in Gleichung (2.19) über:

$$i = \frac{\eta^2 - 2}{\eta^2 - 1} \cdot 100 \% , \quad \text{für } D \text{ gleich Null und } \eta^2 \geq 2 . \quad (2.19)$$

## 2.2 Minimalmodell des Zweimassenschwingers

Als Minimalmodell für die doppelte Schwingungsisolierung kann der Zweimassenschwinger gemäß **Abb. 2.3** angesehen werden. Als Freiheitsgrade werden nur zwei Verschiebungen in einer Richtung berücksichtigt.



**Abb. 2.3** Minimalmodelle für die doppelte Schwingungsisolierung, Zweimassenschwinger  
a) Krafterregung für die Schwingungsisolierung von Maschinen  
b) Weg- bzw. Stützerregung für die Schwingungsisolierung von Geräten

Unter den Objekten mit dem Index 1 wird die bisherige Anordnung "starre Maschine elastisch aufgestellt" gemäß **Abb. 2.1** verstanden. Die Objekte mit dem Index 2 stel-



len das Zwischenfundament und dessen elastische Lagerung dar. Man kann auch sagen, das Modell gemäß Abschnitt 2.1 wurde um eine Masse sowie einen Feder-Dämpfer erweitert. Welchen Einfluss hat dies auf die dynamischen Eigenschaften des Systems?

### 2.2.1 Eigenfrequenzen des Zweimassenschwingers

Durch den zusätzlichen Freiheitsgrad verfügt das Modell über zwei Eigenfrequenzen. Wo liegen diese Frequenzen, verglichen mit der einfachen Schwingungsisolierung? Die Formel zur Berechnung der Eigenfrequenzen des gefesselten Zweimassenschwingers gemäß **Abb. 2.3** lautet

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_1 \cdot (m_1 + m_2) + c_2 \cdot m_1}{m_1 \cdot m_2} \mp \sqrt{\left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{c_1 \cdot (m_1 + m_2) + c_2 \cdot m_1}{m_1 \cdot m_2} \right]^2 - \frac{c_1 \cdot c_2}{m_1 \cdot m_2}}. \quad (2.20)$$

Setzt man

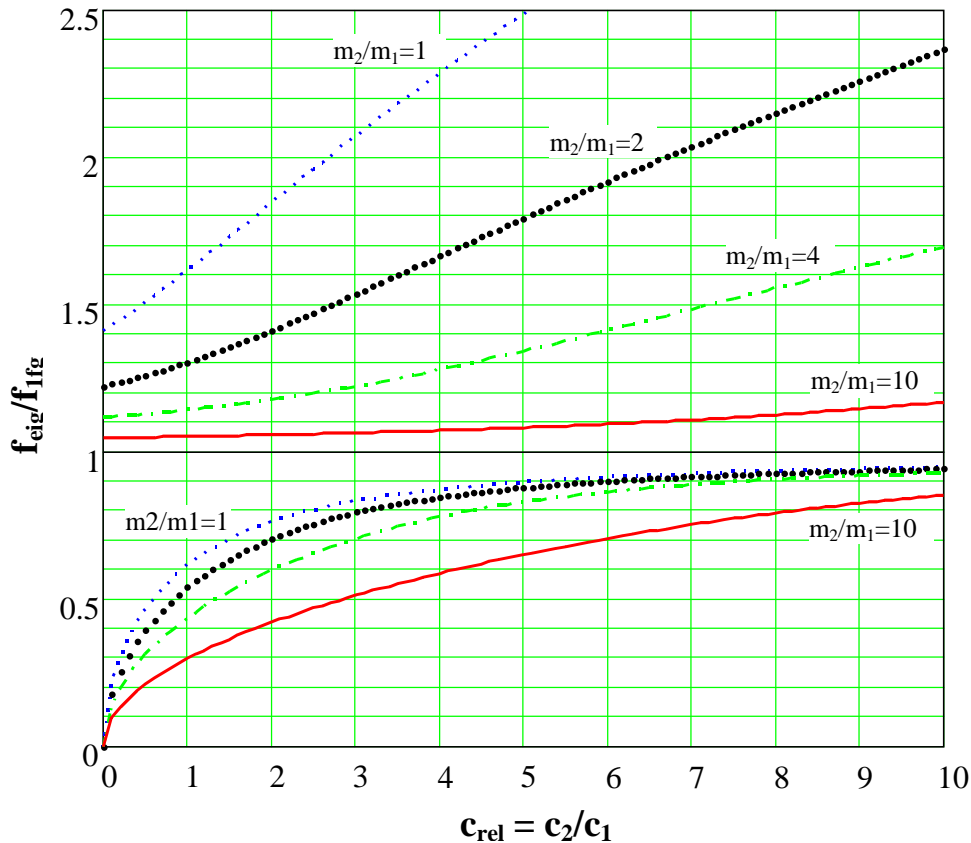
$$c_{rel} = \frac{c_2}{c_1}, \quad m_{rel} = \frac{m_2}{m_1} \quad \text{und} \quad \omega_{1fg}^2 = \frac{c_1}{m_1}, \quad (2.21)$$

erhält man

$$\frac{\omega_{1,2}}{\omega_{1fg}} = \frac{f_{eig}}{f_{1fg}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{m_{rel}} + \frac{c_{rel}}{m_{rel}} \right) \mp \sqrt{\left[ \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{m_{rel}} + \frac{c_{rel}}{m_{rel}} \right) \right]^2 - \frac{c_{rel}}{m_{rel}}}}. \quad (2.22)$$

Der Zusammenhang (2.22) ist in **Abb. 2.4** grafisch dargestellt. Er ist auch in [5] zu finden.

Die Gerade  $f_{eig}/f_{1fg}=1$  in **Abb. 2.4** markiert die Eigenfrequenz des Einmassenschwingers (einfache Schwingungsisolierung). Interessant ist, dass der Zweimassenschwinger (doppelte Schwingungsisolierung) sowohl eine Eigenfrequenz unter als auch über dieser Frequenz hat. Die ursprüngliche Frequenz wird sozusagen in zwei Frequenzen aufgespalten - in eine darunter- und eine darüberliegende. Dieses Phänomen ist unter anderem in [7] ausführlich dargestellt.



**Abb. 2.4** Eigenfrequenzen des gefesselten Zweimassenschwingers, bezogen auf Frequenz und Parameter des Einmassenschwingers

Geht man davon aus, dass die doppelte Schwingungsisolierung versucht wird, weil die Möglichkeiten der einfachen ausgeschöpft sind, stellt man zunächst fest, dass die doppelte Schwingungsisolierung höhere Eigenfrequenzen der Aufstellung bringt.

Dies verschlechtert das Abstimmverhältnis einer tiefen Abstimmung. Damit sich der Abstand zwischen niedrigster Erregerfrequenz und höchster Eigenfrequenz und damit das Abstimmverhältnis möglichst geringfügig verringern, sollte die Kurve für die höhere Eigenfrequenz möglichst nahe an der Geraden  $f_{\text{eig}}/f_{1\text{fg}}=1$  liegen. Das ist für große  $m_2/m_1$  und kleine  $c_2/c_1$  der Fall. Also muss die Fundamentmasse möglichst groß sein (etwa die zehnfache Maschinenmasse). Die Steifigkeit der Federelemente unter dem Fundament sollte nicht wesentlich größer als die Steifigkeit der Federelemente unter der Maschine.

### 2.3 Vergrößerungsfunktion und Isolationsgrad des Zweimassenschwingers

Die Differentialgleichungen für den Zweimassenschwinger gemäß **Abb. 2.3 a)** lauten (unter Vernachlässigung der Dämpfungen  $b_1$  und  $b_2$ ):

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + c_1 \cdot (x_1 - x_2) &= F \quad \text{und} \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 + c_2 \cdot x_2 - c_1 \cdot (x_1 - x_2) &= 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Setzt man in **(2.23)** für die Kraft den Ansatz **(2.3)** und für die Verschiebungen  $x_1$  und  $x_2$  sowie deren Ableitungen Ansätze gemäß **(2.4)** bis **(2.6)** ein, ergibt sich nach einigen Umformungen für  $x_2$ :

$$\tilde{x}_2 = \frac{1}{1 - \frac{m_1}{c_1} \cdot \Omega^2} \cdot \frac{\tilde{F}}{c_1 + c_2 - \frac{c_1}{1 - \frac{m_1}{c_1} \cdot \Omega^2} - m_2 \cdot \Omega^2}. \quad (2.24)$$

Die Kraft auf den Boden ergibt sich für den ungedämpften Zweimassenschwinger zu

$$\tilde{F}_B = c_2 \cdot \tilde{x}_2. \quad (2.25)$$

Mit den Abkürzungen **(2.21)** und

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_{1fg}} \quad (2.26)$$

erhält man für die Übertragungsfunktion **(2.27)**.

$$\frac{\tilde{F}_B}{\tilde{F}} = \frac{c_{rel}}{(1 - \eta^2) \cdot (1 + c_{rel} - m_{rel} \cdot \eta^2) - 1} \quad (2.27)$$

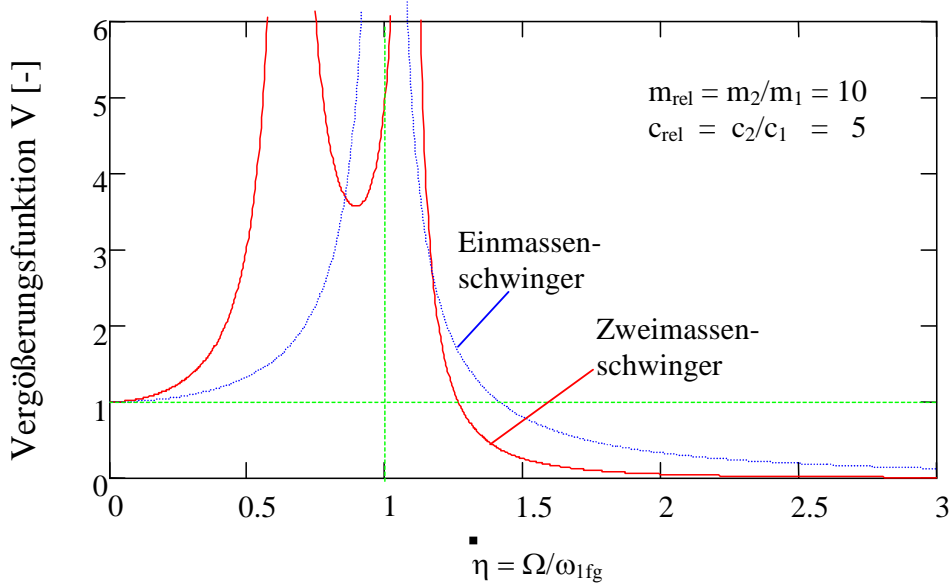
Die Vergrößerungsfunktion ist schließlich der Betrag der Übertragungsfunktion:

$$V = \left| \frac{c_{rel}}{(1 - \eta^2) \cdot (1 + c_{rel} - m_{rel} \cdot \eta^2) - 1} \right|. \quad (2.28)$$

In **Abb. 2.5** ist die Vergrößerungsfunktion **(2.28)** für  $m = 10$  und  $c = 5$  über dem Abstimmverhältnis  $\eta$  dargestellt. Zum Vergleich ist die Vergrößerungsfunktion der Einmassenschwingers **(2.17)** für  $D = 0$  ebenfalls eingetragen.

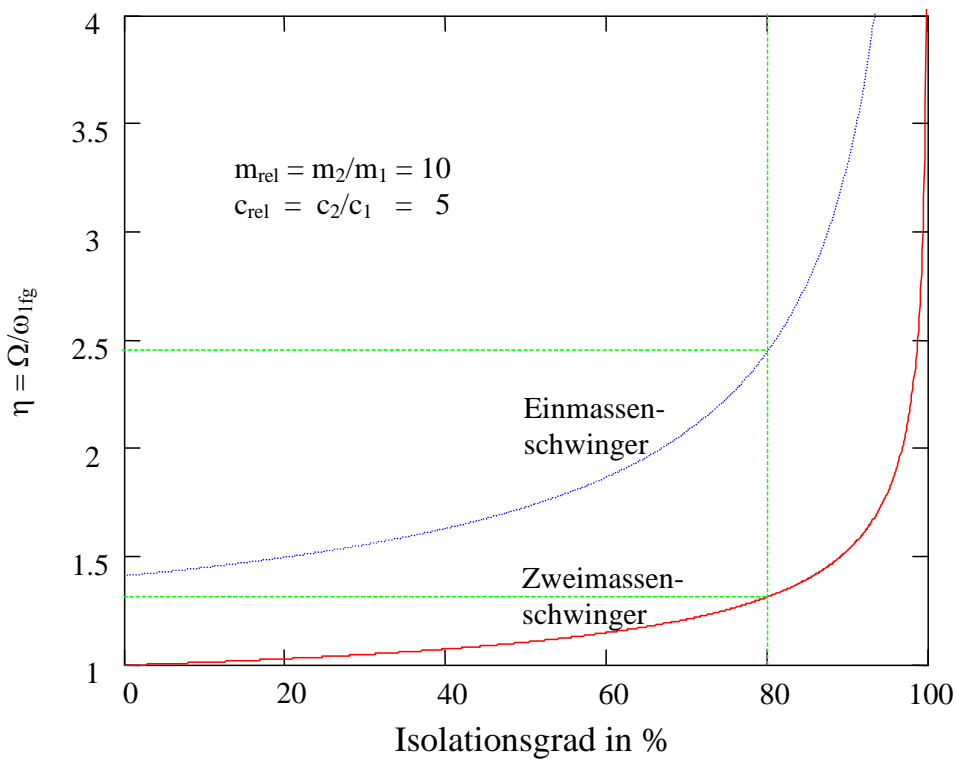
Zunächst bestätigt auch diese Darstellung die Aussagen des Abschnitts **2.2.1**. Anhand der Überhöhungen erkennt man, dass aus der ursprünglichen Frequenz des Einmassenschwingers zwei geworden sind. Die höhere Frequenz des Zweimassenschwingers liegt über derjenigen des Einmassenschwingers.

Gleichfalls zeigt **Abb. 2.5**, dass die Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers nach Durchschreiten der Resonanzstellen (besonders der zweiten) stärker als die des Einmassenschwingers abfällt. Diese Tatsache will man sich bei doppelter Schwingungsisolierung und tiefer Abstimmung zunutze machen. Man kann bei gleichem  $\eta$  einen größeren Isolationsgrad erzielen bzw. einen gewünschten Isolationsgrad bei geringerem Abstand zur Resonanzstelle erreichen **Abb. 2.6**.



**Abb. 2.5** Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers im Vergleich zum Einmassenschwinger für tiefe Abstimmung

Ist beispielsweise ein Isolationsgrad von 80 % gewünscht, wird beim Einmassenschwinger ein Abstimmverhältnis  $\eta$  von 2,45 benötigt. Beim Zweimassenschwinger dagegen genügt für den gleichen Isolationsgrad ein  $\eta$  von 1,3 (**Abb. 2.6**).



**Abb. 2.6**  $\eta$  als Funktion des Isolationsgrades für den Ein- und Zweimassenschwinger

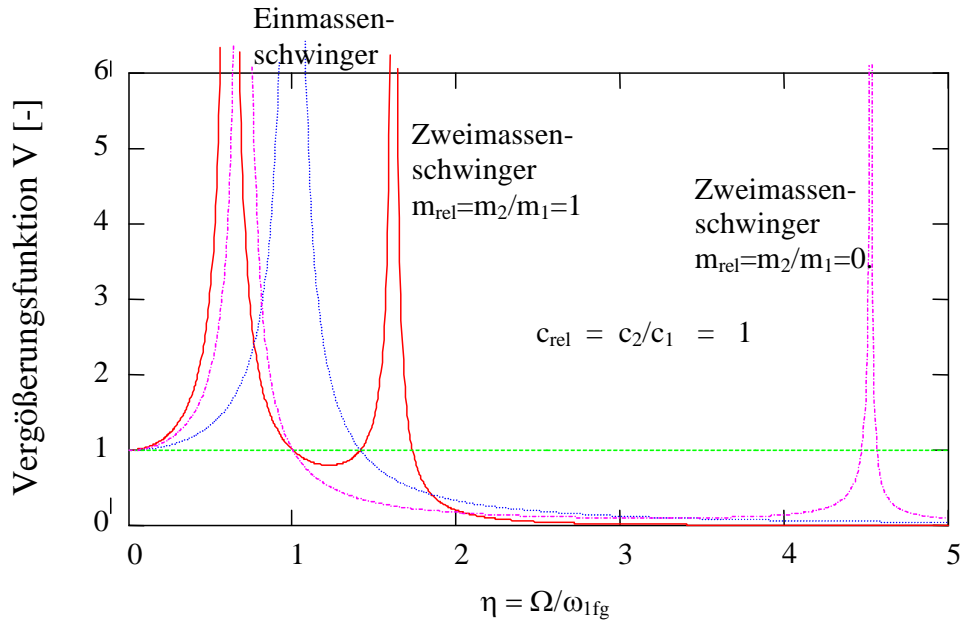
An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass der Begriff des Abstimmverhältnisses beim Zweimassenschwinger nicht eindeutig ist. Das liegt zum einen daran, dass der Zweimassenschwinger zwei Resonanzstellen hat und man sich nur auf eine beziehen kann. Wie in diesem Bericht bezieht man sich zum besseren Vergleich mit dem Einmassenschwinger bei  $\eta$  auch gern auf  $\omega_{1fg} = \sqrt{c_1/m_1}$  - eine Größe, die wohl die Eigenfrequenz des Einmassenschwingers charakterisiert, für den Zweimassenschwinger jedoch keine Eigenfrequenz darstellt. Deshalb soll im Weiteren mit dem Isolationsgrad gearbeitet werden, der immer eindeutig ist und gleichzeitig den gewünschten Effekt der Schwingungsisolierung - die Reduzierung der Schwingungsamplituden - zum Ausdruck bringt.

Außerdem zeigt **Abb. 2.5**, dass die Verbesserung der Isolierwirkung per doppelter Schwingungsisolierung und tiefer Abstimmung nur in einem ganz engen Parameterbereich zum Erfolg führt. Geht man davon aus, dass zuvor die einfache Schwingungsisolierung versucht wurde, muss das dabei erzielte  $\eta$  größer 1 sein. Das heißt, die Eigenfrequenz der einfach aufgestellten Maschine muss schon unter der kleinsten Erregerfrequenz liegen. Ein Absenken der Eigenfrequenz der Aufstellung durch die doppelte Schwingungsisolierung ist nicht möglich. Es kann nur der Isolationsgrad verbessert werden.

Nun wäre noch die gemischte Abstimmung interessant. Hierbei besteht das Ziel darin, beide Eigenfrequenzen möglichst weit von der Erregerfrequenz wegzubringen, d. h., die erste Eigenfrequenz sollte möglichst niedrig und die zweite möglichst hoch sein. Eine kleine erste Eigenfrequenz liefert ein möglichst kleines  $c_{rel}$  (**Abb. 2.4**). Ein  $c_{rel} < 1$  ist praktisch nicht realisierbar, da für die einfache Schwingungsisolierung bereits die weichsten Isolatoren ( $c_1$ ), die die gegebenen Belastungen ertragen, ermittelt wurden. Die Isolatoren  $c_2$  müssen zu diesen Belastungen noch die Belastung durch das Fundament ertragen. Damit können sie mit Sicherheit nicht weicher als  $c_1$  sein. (Belastbarkeit und Steifigkeit der Isolatoren sind im Allgemeinen indirekt proportional, d. h. gegenläufig.) Das Verhältnis der Massen sollte für die gemischte Abstimmung klein sein (**Abb. 2.7**) (ein großes  $m_{rel}$  war für die tiefe Abstimmung von Vorteil).

**Abb. 2.7** und Gleichung (2.28) zeigen, dass die Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers für  $c_{rel} = 1$  bei  $\eta = 1$  den Wert 1 hat, d. h. der Isolationsgrad ist 0. Isolierwirkung bei  $\eta = 1$  und gemischter Abstimmung kann nur für  $c_{rel}$  kleiner 1 erreicht werden, was aus oben genannten Gründen praktisch nicht möglich ist. Neben der Tatsache, dass oft auch Resonanzen mit der zweiten, höheren Eigenfrequenz problematisch sind, fällt die Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers nach der ersten Resonanzstelle auch noch weniger stark ab als nach der zweiten, womit man gleich bei der tiefen Abstimmung bleiben kann.

Bleibt noch die Anbringung von Tilgern. Hierbei wären  $c_2$  und  $m_2$  Steifigkeit und Masse der aufzustellenden Maschine,  $c_1$  und  $m_1$  das Tilgersystem. Die praktische Bedeutung von Tilgern ist nach [7] eher gering, da große Tilgermassen benötigt werden. Tilger werden auf die Erregerfrequenz abgestimmt und somit in Resonanz betrieben. Damit verbunden sind große Schwingamplituden der Masse ( $m_1$ ) und große Belastungen der Federn ( $c_1$ ).



**Abb. 2.7** Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers im Vergleich zum Einmassenschwinger für gemischte Abstimmung

Damit ist die Bedeutung der doppelten Schwingungsisolierung nicht so groß wie allgemein angenommen. Dennoch ist es sinnvoll, diese Option in das Programm zu integrieren, weil sich damit die Berechnungsmöglichkeiten erweitern und beispielsweise auch Einflüsse von Baugründen, Gründungen oder elastischen Zwischenschichten berücksichtigen lassen.

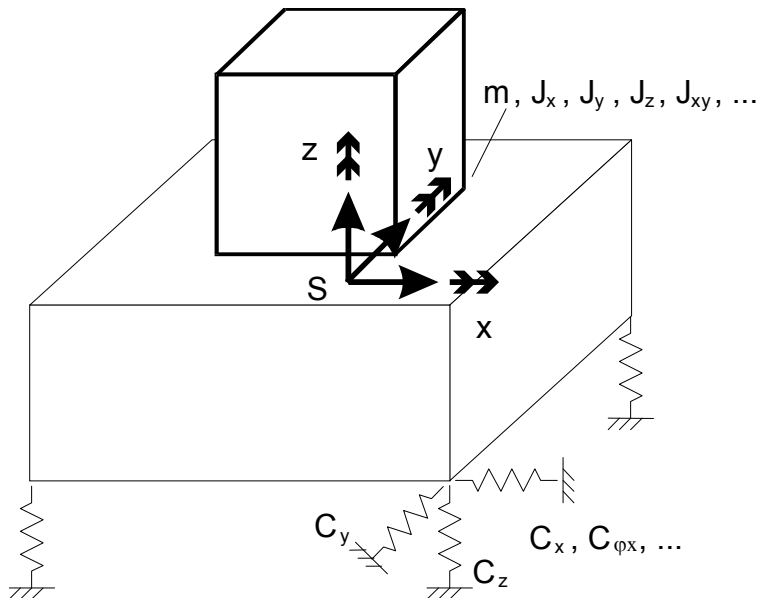
## 2.4 Das Blockfundament - der Schwinger mit 6 Freiheitsgraden

Jede im Raum elastisch aufgestellte starre Maschine (ohne oder mit starr gekoppeltem Fundament) hat 6 Freiheitsgrade, wenn man die Aufstellelemente als masselos ansieht. Für ein System mit 6 Freiheitsgraden ergeben sich 6 Eigenfrequenzen. Fordert man nun eine tiefe Abstimmung, muss die höchste Eigenfrequenz kleiner als die niedrigste Erregerfrequenz sein. Eine Modellierung der Maschinenaufstellung mit nur einem Freiheitsgrad ist also unzureichend, da dieses Modell nur eine Eigenfrequenz liefert und somit 5 weitere unberücksichtigt bleiben. Es kann so nicht geprüft werden, ob alle der 6 vorhandenen Eigenfrequenzen genügend weit von den Erregerfrequenzen entfernt sind, wie das beispielsweise für die gemischte Abstimmung gefordert wird. Somit können Resonanzerscheinungen nicht ausgeschlossen werden.

Deshalb wird im vorliegenden Programm das Blockfundament - eine starre Einheit, bestehend aus Maschine und/oder Fundament, - betrachtet. Es ist elastisch gelagert und verfügt wie der starre Körper über 6 Freiheitsgrade. Der Schwinger mit einem Freiheitsgrad ist in diesem Modell als Sonderfall enthalten.

**Abb. 2.8** zeigt das Modell des Blockfundamentes. Das Koordinatensystem liegt im Massenschwerpunkt S. Die Koordinaten  $x$ ,  $y$ , und  $z$  bilden die drei Verschiebefreiheitsgrade ab, während die Koordinaten  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ , und  $\varphi_z$  die drei Verdrehfreiheitsgrade

de beschreiben. Bezüglich dieser 6 Koordinaten werden die Trägheitseigenschaften des starren Körpers berechnet ( $m, J_x, J_y, J_z, J_{xy}, \dots$ ). Die Feder-Dämpfer-Elemente können ebenfalls Steifigkeiten bzw. Dämpfungen in 6 Richtungen haben ( $c_x, c_y, c_z, c_{\varphi x}, \dots$ ). Da sie im Allgemeinen nicht im Schwerpunkt angreifen und ihre Lage bezüglich des Schwerpunktkoordinatensystems gedreht sein kann, wird ihre Wirkung per Transformation auf das Schwerpunktsystem umgerechnet. Angreifende Kräfte und Momente werden ebenfalls auf dieses Koordinatensystem transformiert.



**Abb. 2.8** Modell des elastisch gelagerten Blockfundamentes, mit starrer Kopplung Maschine - Fundament und 6 Freiheitsgraden

Stellt man für das Blockfundament die Bewegungsgleichungen auf, erhält man ein System von 6 Gleichungen. In Matrixschreibweise lautet es:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (2.29)$$

Die Lösung des Differentialgleichungssystems (2.29) liefert zunächst 6 Eigenfrequenzen und 6 Eigenvektoren. Sind außerdem Ergebnisverläufe im Zeit- oder Frequenzbereich gesucht, ist es sinnvoll, das Gleichungssystem zu entkoppeln. Dazu transformiert man (2.29), unter Verwendung der Matrix der Eigenvektoren und unter gewissen Forderungen zur Dämpfungsmatrix  $[\mathbf{11}]$ , auf so genannte Hauptkoordinaten. Die Matrizen  $\mathbf{M}$  und  $\mathbf{C}$  werden damit zu Diagonalmatrizen. Das Gleichungssystem zerfällt in 6 Einzelgleichungen, die den Gleichungen des Schwingers mit einem Freiheitsgrad entsprechen.

Die in Hauptkoordinaten berechneten Ergebnisse lassen sich dann auf jedes Koordinatensystem zurück transformieren, so dass man z. B. die Belastungen in den Aufstellelementen oder die Bewegungsgrößen beliebiger Punkte erhalten kann.

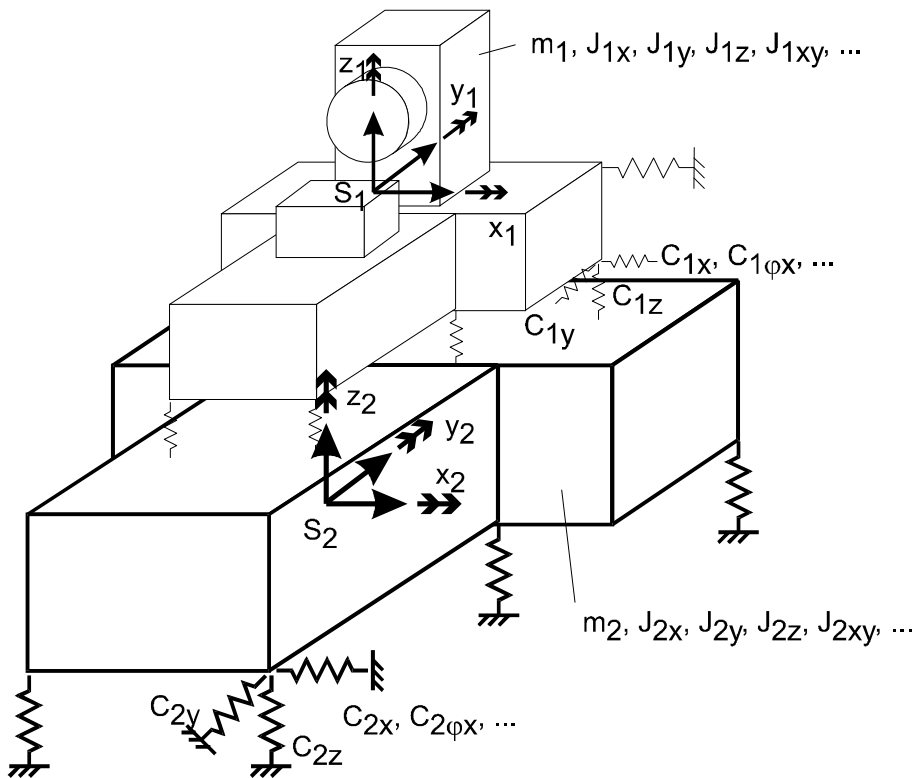
Einzelheiten zu den im Programm **ISOMAG** verwendeten Algorithmen findet man unter 3.1.

## 2.5 Doppelte Schwingungsisolierung im Raum – der Schwinger mit 12 Freiheitsgraden

Häufig wird versucht, die Isolierwirkung mit der so genannten doppelten Schwingungsisolierung zu verbessern. Für die Modellierung der doppelten Schwingungsisolierung sind 2 starre Körper erforderlich – einer für die Maschine (inklusive starr angekoppelter Komponenten) und einer für das elastisch mit der Maschine verbundene Fundament. Da jeder Körper über 6 Freiheitsgrade im Raum verfügt (Abschnitt 2.5), hat das System 12 Freiheitsgrade und somit 12 Eigenfrequenzen. Für eine erfolgreiche Abstimmung müssen alle Frequenzen berücksichtigt werden. Minimalmodelle gemäß Abschnitt 2.1 oder 2.2 sind im Allgemeinen unzureichend, jedoch als Sonderfall enthalten.

**Abb. 2.9** zeigt das Modell. Einen starren Körper bildet die Maschine (Index 1), den zweiten das Fundament (Index 2). Die Koordinatensysteme liegen im jeweiligen Massenschwerpunkt der Starrkörper ( $S_1$  und  $S_2$ ). Die Koordinaten  $x$ ,  $y$ , und  $z$  bilden die drei Verschiebefreiheitsgrade ab, während die Koordinaten  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ , und  $\varphi_z$  die drei Verdrehfreiheitsgrade beschreiben. Bezüglich der 6 Koordinaten der Starrkörper werden deren Trägheitseigenschaften berechnet ( $m_1$ ,  $J_{1x}$ ,  $J_{1y}$ , ...  $J_{2y}$ ,  $J_{2z}$ ,  $J_{2xy}$ , ...). Die Feder-Dämpfer-Elemente können ebenfalls Steifigkeiten bzw. Dämpfungen in 6 Richtungen haben ( $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$ ,  $c_{\varphi_x}$ , ...). Sie können zwischen Maschine und Fundament (Index 1), Fundament und starrer Umgebung (Index 2) oder Maschine und starrer Umgebung angeordnet sein. Da sie im Allgemeinen nicht in den Schwerpunkten angreifen und ihre Lage bezüglich der Schwerpunktkoordinatensysteme gedreht sein kann, wird ihre Wirkung per Transformation auf die Schwerpunktsysteme umgerechnet (Anbindungen an Körper 1 auf Schwerpunktsystem 1, Anbindungen an Körper 2 auf Schwerpunktsystem 2). Angreifende Kräfte und Momente werden ebenfalls auf diese Koordinatensysteme transformiert.





**Abb. 2.9** Elastisch gelagerte Maschine auf elastisch gelagertem Fundament, Modell mit 2 Starrkörpern und 12 Freiheitsgraden

Die weitere Rechnung kann analog **(2.29)** erfolgen. Ausnahme: Jetzt sind 12 Gleichungen zu berücksichtigen, womit sich auch 12 Eigenfrequenzen und Schwingformen ergeben.

## 2.6 Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften des Aufstellortes – der Schwinger mit 13 Freiheitsgraden

Oft kann die Umgebung bzw. der Aufstellort nicht als starr angenommen werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Aufstellungen auf Gebäudedecken erfolgen sollen oder Gründungen zu berücksichtigen sind. Die Eigenfrequenzen, Kräfte und Bewegungsverläufe der aufgestellten Maschine weichen dann von denen bei starrer Umgebung ab. Da in diesen Fällen die dynamischen Eigenschaften der Umgebung nur in vertikaler Richtung von Interesse sind, genügt die Einführung eines weiteren, 13. Freiheitsgrades: die Verschiebung der Umgebung in  $z$ -Richtung (**Abb. 2.15**). Die eigentlich kontinuierlich verteilten Steifigkeits- und Trägheitsparameter der Umgebung lassen sich in ihrer Wirkung auf diese eine Koordinate (diskrete Werte) umrechnen, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

### 2.6.1 Grundlagen der Berücksichtigung des Aufstellortes

Ein verformbarer Aufstellort, welcher ein Kontinuum darstellt (verteilte Steifigkeits- und Trägheitsparameter), kann für einen bestimmten Punkt auf ein diskretes Ersatzmodell reduziert werden. Setzt man für diesen Punkt die Position der Maschine bzw.

des Fundamentes ein, erhält man die Ersatzparameter für die zu untersuchende Aufstellung. Dabei müssen das Modell und das Kontinuum gleiche dynamische Eigenschaften aufweisen. Das bedeutet, dass die kinetische und die potentielle Energie beider Systeme bei gleicher Schwingungsamplitude im Reduktionspunkt gleich sein müssen. Das Einmassen-Ersatzmodell kann nur die erste Eigenfrequenz des Kontinuums reproduzieren.

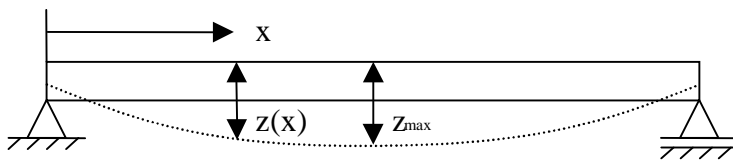
Wie gut das Ersatzmodell die erste Eigenfrequenz des Kontinuums widerspiegelt, hängt vom gewählten Ansatz für die Verformung ab. Setzt man die exakte Schwingform ein, erhält man auch die Frequenz exakt. Häufig sind aber die exakten Schwingformen nicht bekannt oder würden die Rechnung unnötig komplizieren, so dass man Ansätze wählt, die die Schwingform annähernd beschreiben. Üblich sind Parabelansätze, die der statischen Verformung entsprechen, oder Sinus- bzw. Kosinusansätze, die sich rechentechnisch gut behandeln lassen. Verschiedene Ansätze (trigonometrisch oder Parabel) eignen sich für verschiedene Lagerungen/Randbedingungen unterschiedlich gut. Im vorliegenden Projekt wird durchgängig mit trigonometrischen Ansätzen gearbeitet. Beispielrechnungen haben gezeigt, dass die größten Abweichungen bei ca. 3 % liegen. Für praktische Anwendungen ist dies völlig ausreichend, da die größeren Unsicherheiten z. B. in den Deckenparametern liegen.

Zunächst wird die kinetische Energie des Kontinuums mit Hilfe eines Ansatzes für die Verformung der Eigenschwingform der ersten Eigenfrequenz berechnet. Aus der Gleichsetzung dieser Energie mit der kinetischen Energie des Ersatzmodells lässt sich die Ersatzmasse bestimmen. Bei bekannter Eigenfrequenz des Aufstellortes ergibt sich dann aus der Frequenzgleichung des Einmassenschwingers die zugehörige Ersatzsteife. Ist die Eigenfrequenz nicht bekannt, kann mit dem gleichen Verformungsansatz die potentielle Energie berechnet werden, die nach Gleichsetzen mit der potentiellen Energie des Ersatzmodells die Ersatzsteifigkeit liefert.

Da die Schwingformen und somit auch die Ansätze für Balken und Platte sowie für verschiedene Lagerungen unterschiedlich sind, werden im Folgenden Ersatzparameter für verschiedene Anordnungen berechnet.

### 2.6.1.1 Ersatzparameter für den beidseitig gelenkig gelagerten Balken

**Abb. 2.10** zeigt den beidseitig gelenkig gelagerten Balken, seine erste Schwingform sowie die gewählten Koordinaten und Bezeichnungen.



**Abb. 2.10** Erste Schwingform eines beidseitig gelenkig gelagerten Balkens

Für einen gelenkig gelagerten Balken der Länge  $l_x$  wird für  $z = f(x, t)$  folgender Ansatz gewählt:

$$z(x, t) = z_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t), \quad (2.30)$$

wobei  $\omega_1$  die erste Eigenkreisfrequenz des Balkens bzw. Kontinuums ist.

Folgende Randbedingungen werden damit erfüllt:

$$\begin{aligned} z(x=0, t) &= 0, \\ z(x=l_x, t) &= 0 \text{ und} \\ z(x=l_x/2, t) &= z_{\max}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Die kinetische Energie eines Kontinuums ergibt sich aus:

$$W_{kin} = \int_0^{l_x} \rho \cdot \frac{A}{2} \cdot \dot{z}^2(x, t) \cdot dx, \quad (2.32)$$

wobei A die Querschnittsfläche des Balkens und  $\rho$  seine Dichte sind.

Für den gelenkig gelagerten Balken folgt mit **(2.30)**:

$$\begin{aligned} W_{kin} &= \rho \cdot \frac{A \cdot \omega_1^2}{2} \cdot z_{\max}^2 \cdot \cos^2(\omega_1 \cdot t) \cdot \int_0^{l_x} \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot dx \\ &= \rho \cdot \frac{A \cdot l_x}{2} \cdot \frac{z_{\max}^2 \cdot \omega_1^2}{2} \cdot \cos^2(\omega_1 \cdot t) \\ &= \frac{m}{2} \cdot \frac{z_{\max}^2 \cdot \omega_1^2}{2} \cdot \cos^2(\omega_1 \cdot t) \end{aligned}, \quad (2.33)$$

mit der Balkenmasse  $m = \rho \cdot A \cdot l_x$ .

Die kinetische Energie für das Ersatzmodell berechnet sich aus:

$$\begin{aligned} W_{kin} &= \frac{m_{ers}}{2} \cdot \dot{z}(x)^2 \\ &= \frac{m_{ers} \cdot \omega_1^2}{2} \cdot z_{\max}^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot \cos^2(\omega_1 \cdot t) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Gleichsetzen von **(2.33)** und **(2.34)** liefert:

$$m_{ers} = \frac{m}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right)}. \quad (2.35)$$

Bei bekannter Eigenfrequenz  $\omega_1$  des Kontinuums wird die Ersatzsteife **(2.37)** aus der Frequenzgleichung für den Einmassenschwinger bzw. das Ersatzmodell **(2.36)** berechnet:

$$\omega_1^2 = \frac{c}{m} = \frac{c_{ers}}{m_{ers}} \quad (2.36)$$

$$c_{ers} = \omega_1^2 \cdot m_{ers} = (2 \cdot \pi \cdot f_1)^2 \cdot m_{ers}. \quad (2.37)$$

Ist die Eigenfrequenz unbekannt, kann die Ersatzsteifigkeit durch Gleichsetzen der potentiellen Energien des Kontinuums und des Ersatzmodells berechnet werden. Theoretisch sind beide Methoden gleichwertig. Wegen der Unsicherheiten in den Deckenparametern wäre in der Praxis **(2.37)** vorzuziehen.

Die potentielle Energie des Balkens berechnet sich für das Kontinuum nach **(2.38)**.

$$W_{pot} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{l_x} E \cdot I \cdot \left( \frac{d^2 z}{dx^2} \right)^2 dx. \quad (2.38)$$

Dabei sind E der Elastizitätsmodul und I das Trägheitsmoment der Querschnittsfläche, welches sich beispielsweise für den Balken mit rechteckigem Querschnitt der Breite  $l_y$  und der Höhe  $l_z$  nach **(2.39)** ergibt:

$$I = \frac{l_y \cdot l_z^3}{12}. \quad (2.39)$$

Mit dem Ansatz **(2.30)** ergibt sich

$$W_{pot} = \frac{\pi^4 \cdot E \cdot I}{4 \cdot l_x^3} \cdot z_{\max}^2 \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t). \quad (2.40)$$

Das Ersatzmodell hat die Potentielle Energie

$$W_{pot} = \frac{c_{ers}}{2} \cdot z^2. \quad (2.41)$$

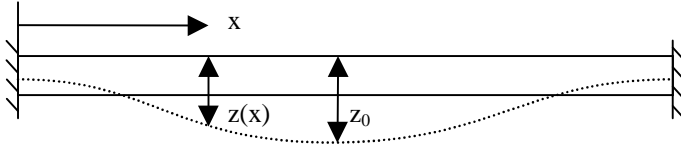
Setzt man **(2.30)** in **(2.41)** ein, ergibt sich

$$W_{pot} = \frac{c_{ers}}{2} \cdot z_{\max}^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t). \quad (2.42)$$

Das Gleichsetzen der Energien **(2.40)** und **(2.42)** liefert schließlich die Ersatzsteifigkeit für den beidseitig gelenkig gelagerten Balken bei bekannten Werkstoff- (E-Modul) und Geometrie-Daten (I und  $l_x$ ):

$$c_{ers} = \frac{\pi^4 \cdot E \cdot I}{2 \cdot l_x^3 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right)}. \quad (2.43)$$

### 2.6.1.2 Ersatzparameter für den beidseitig eingespannten Balken



**Abb. 2.11** Beidseitig eingespannter Balken

Für den beidseitig eingespannten Balken nach **Abb. 2.11** wird der Verformungsansatz **(2.44)** gewählt:

$$z(x, t) = \frac{z_{\max}}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right)\right) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t), \quad (2.44)$$

der die Randbedingungen

$$\begin{aligned} z(x=0, t) &= 0, \\ z(x=l_x, t) &= 0, \\ \frac{dz}{dx}(x=0, t) &= 0, \\ \frac{dz}{dx}(x=l_x, t) &= 0 \text{ und} \\ z(x=l_x/2, t) &= z_{\max} \end{aligned} \quad (2.45)$$

erfüllt.

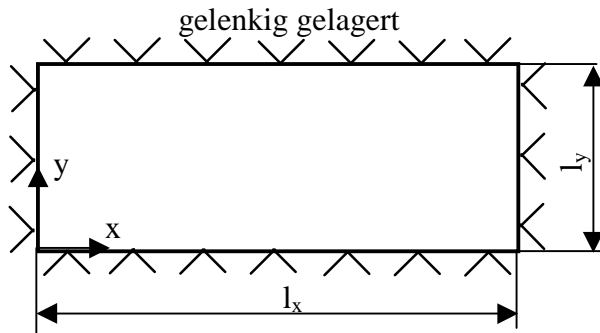
Die Berechnung der Ersatzparameter erfolgt analog Abschnitt **2.6.1.1**. Man erhält für die Ersatzmasse

$$m_{ers} = \frac{3 \cdot m}{2 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right)\right)^2}. \quad (2.46)$$

Bei bekannter Eigenfrequenz des Aufstellortes ergibt sich die Ersatzsteifigkeit nach **(2.37)**. Andernfalls lässt sie sich nach **(2.47)** berechnen:

$$c_{ers} = \frac{8 \cdot \pi^4 \cdot E \cdot I}{l^3 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right)\right)^2}. \quad (2.47)$$

### 2.6.1.3 Ersatzparameter für die allseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte



**Abb. 2.12** Allseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte

Für die allseitig gelagerte Rechteckplatte mit den Kantenlängen  $l_x$  und  $l_y$  (**Abb. 2.12**) wird für die Verformung der Ansatz **(2.48)** gewählt:

$$z(x, y, t) = z_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{l_y}\right) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t). \quad (2.48)$$

Er erfüllt folgende Bedingungen für die Verformung  $z$ :

$$\begin{aligned} z(x=0, y, t) &= 0, \\ z(x=l_x, y, t) &= 0, \\ z(x, y=0, t) &= 0, \\ z(x, y=l_y, t) &= 0 \text{ und} \\ z(x=l_x/2, y=l_y/2, t) &= z_{\max}. \end{aligned} \quad (2.49)$$

Die kinetische Energie der Platte berechnet sich für das Kontinuum nach **(2.50)**, z. B. in **[9]**.

$$\begin{aligned} W_{kin} &= \int_A \rho \cdot \frac{l_z}{2} \cdot \dot{z}^2 dA \\ &= \rho \cdot \frac{l_z}{2} \cdot \int_{x=0}^{l_x} \int_{y=0}^{l_y} \dot{z}^2 dy dx \end{aligned} \quad (2.50)$$

Wird **(2.48)** in **(2.50)** eingesetzt und mit der Energie des Einmassenschwingers gleichgesetzt, erhält man die Ersatzmasse der allseitig gelenkig gelagerten Rechteckplatte **(2.51)** (analog Abschnitt **2.6.1.1**):

$$m_{ers} = \frac{m}{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot y}{l_y}\right)}. \quad (2.51)$$

Bei bekannter Eigenfrequenz des Aufstellortes ergibt sich die Ersatzsteifigkeit nach (2.37). Andernfalls lässt sie sich durch Gleichsetzung der potentiellen Energien des Kontinuums und des diskreten Einmassenschwingers bestimmen. Für Platten berechnet sich die potentielle Energie nach (2.52), z. B. in [9]

$$W_{pot} = \frac{1}{2} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} K \cdot \left[ \left( \frac{d^2 z}{dx^2} \right)^2 + \left( \frac{d^2 z}{dy^2} \right)^2 + 2 \cdot \nu \cdot \left( \frac{d^2 z}{dx^2} \right) \cdot \left( \frac{d^2 z}{dy^2} \right) + 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \left[ \frac{d}{dx} \left( \frac{dz}{dy} \right) \right]^2 \right] dy dx \quad (2.52)$$

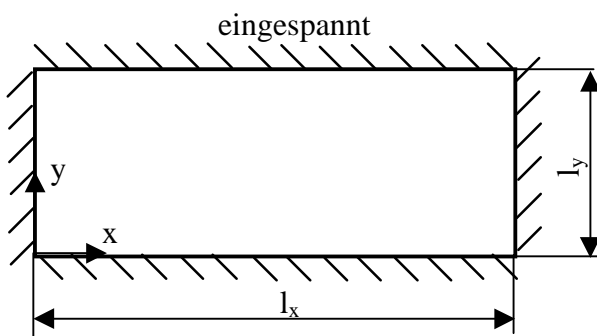
Dabei ist  $\nu$  die Querkontraktionszahl. Die Biegesteifigkeit  $K$  berechnet sich nach

$$K = \frac{E \cdot I_z^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (2.53)$$

Mit dem Ansatz (2.48) ergibt sich nach einigen Rechenschritten die diskrete Ersatzsteifigkeit der allseitig gelenkig gelagerten Platte:

$$c_{ers} = \frac{K \cdot \pi^4}{2 \cdot l_x \cdot l_y} \cdot \frac{\left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{l_y^2}{l_x^2} + \frac{l_x^2}{l_y^2} \right) + 1 \right]}{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot x}{l_x}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot y}{l_y}\right)}. \quad (2.54)$$

#### 2.6.1.4 Ersatzparameter für die allseitig eingespannte Rechteckplatte



**Abb. 2.13** Allseitig eingespannte Rechteckplatte

Die Rechnung erfolgt analog Abschnitt 2.6.1.3. Als Ansatz wird (2.55) gewählt:

$$z(x, y, t) = \frac{z_{max}}{4} \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right) \right) \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot y}{l_y}\right) \right) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \quad (2.55)$$

Dieser Ansatz erfüllt neben (2.49) zusätzlich die Bedingung, dass die Neigungen an den Plattenrändern gleich null sind:

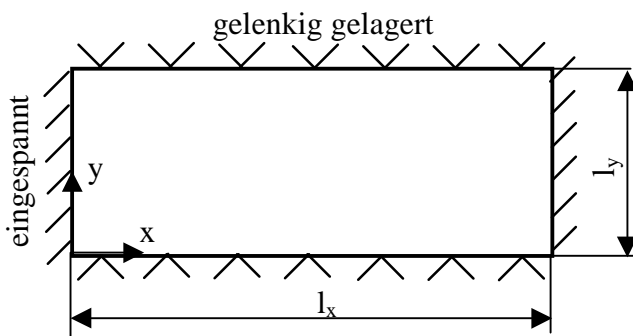
$$\begin{aligned} \frac{dz}{dy}(x=0, y, t) &= 0, \\ \frac{dz}{dy}(x=l_x, y, t) &= 0, \\ \frac{dz}{dx}(x, y=0, t) &= 0 \text{ und} \\ \frac{dz}{dx}(x, y=l_y, t) &= 0. \end{aligned} \tag{2.56}$$

Die diskrete Ersatzmasse wird nach (2.57) berechnet, während sich die diskrete Ersatzsteifigkeit aus den Plattenparametern nach (2.58) ergibt:

$$m_{ers} = \frac{9 \cdot m}{4 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right)\right)^2 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot y}{l_y}\right)\right)^2} \tag{2.57}$$

$$c_{ers} = \frac{4 \cdot K \cdot \pi^4}{l_x^3 \cdot l_y^3} \cdot \frac{3 \cdot (l_x^4 + l_y^4) + 2 \cdot l_x^2 \cdot l_y^2}{\left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right)\right)^2 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot y}{l_y}\right)\right)^2}. \tag{2.58}$$

#### 2.6.1.5 Ersatzparameter für die an gegenüberliegenden Seiten eingespannte bzw. gelenkig gelagerte Rechteckplatte



**Abb. 2.14** Eingespannte bzw. gelenkig gelagerte Rechteckplatte

Die in **Abb. 2.14** dargestellte Platte ist an den Rändern  $x = 0$  und  $x = l_x$  eingespannt sowie an den Rändern  $y = 0$  und  $y = l_y$  gelenkig gelagert. Der Ansatz für die Verformung (2.59) ist eine Kombination aus (2.48) und (2.55):



$$z(x, y, t) = \frac{z_{\max}}{2} \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right) \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{l_y}\right) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t). \quad (2.59)$$

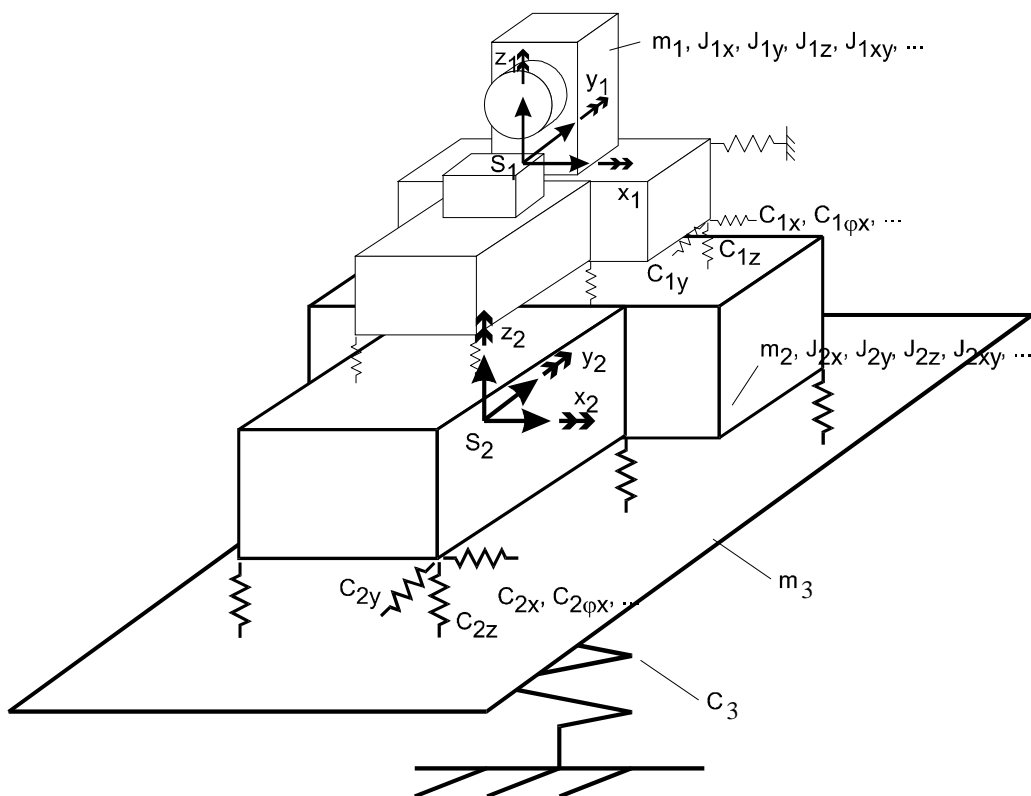
Er liefert nachstehende Ersatzmasse und Ersatzsteifigkeit für das diskrete Modell:

$$m_{\text{ers}} = \frac{3 \cdot m}{4 \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right) \right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot y}{l_y}\right)} \quad (2.60)$$

$$c_{\text{ers}} = \frac{K \cdot \pi^4}{4 \cdot l_x^3 \cdot l_y^3} \cdot \frac{16 \cdot l_y^4 + 3 \cdot l_x^4 + 8 \cdot l_x^2 \cdot l_y^2}{\left( 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l_x}\right) \right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot y}{l_y}\right)}. \quad (2.61)$$

## 2.6.2 Struktur des Gesamtmodells

Mit den diskreten Ersatzparametern gemäß Abschnitt 2.6.1 ergibt sich die in **Abb. 2.15** dargestellte Struktur des Gesamtmodells mit 13 Freiheitsgraden. Modelle mit weniger Freiheitsgraden sind in diesem Modell als Teilmodelle enthalten.



**Abb. 2.15** Elastisch gelagerte Maschine auf elastisch gelagertem Fundament mit elastischem Aufstellort, Modell mit 2 Starrkörpern, einer Masse und 13 Freiheitsgraden

## 2.7 Umrechnung kontinuierlich verteilter Steifigkeiten auf diskrete Parameter

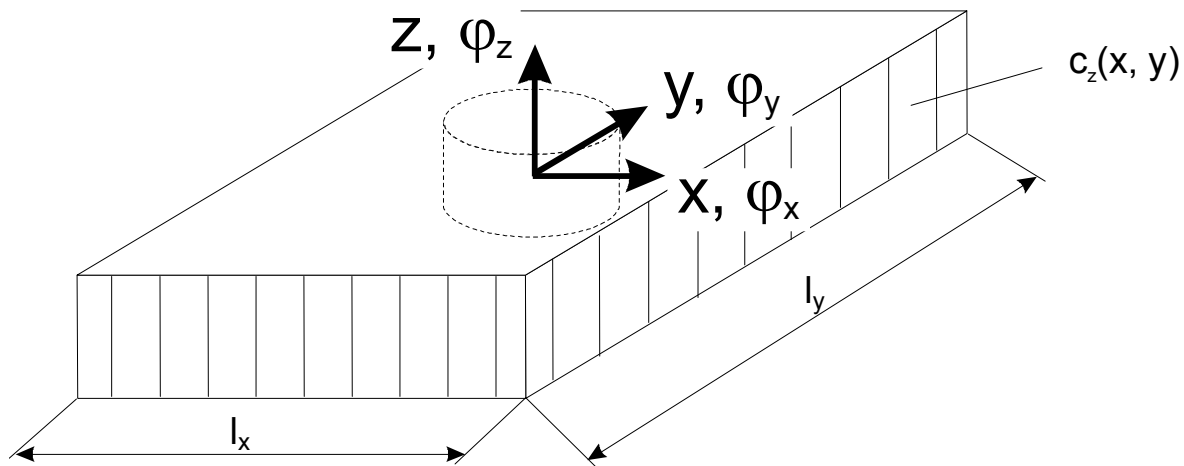
In **ISOMAG** können nur Federelemente mit diskreten Parametern berücksichtigt werden, was für die Modellierung von diskreten Federn wie Isolatoren oder Rohrschlüssen völlig ausreichend ist.

Zum Beispiel bei Matten oder Baugründen liegen verteilte Steifigkeiten vor. Diese können diese auf diskrete Steifigkeiten umgerechnet werden und somit gleichfalls im Programm Berücksichtigung finden.

### 2.7.1 Eindimensionale Steifigkeiten

Sind die Steifigkeitswirkungen entkoppelt oder ist nur eine Richtung der Steifigkeitswirkung zu betrachten, kann die folgende Berechnung der diskreten Ersatzparameter angewendet werden.

Wie bereits im Abschnitt **2.6.1** erläutert, wird auch hier wieder die Energie des kontinuierlichen Modells mit der des diskreten Modells gleichgesetzt. Betrachtet wird eine in der x-y-Ebene verteilte Steifigkeit in z (**Abb. 2.16**). Da es sich um eine auf die Fläche bezogene Längssteifigkeit handelt, hat sie die Dimension N/m/m<sup>2</sup> bzw. N/m<sup>3</sup>.



**Abb. 2.16** Verteilte Steifigkeit  $c_z(x, y)$

Wie unter anderem in [7] aufgeschrieben, berechnet sich die potentielle Energie des Kontinuums nach (2.62):

$$W_{pot} = \frac{1}{2} \int_A c_z(x, y) \cdot z(x, y)^2 dA. \quad (2.62)$$

Für die Energie des diskreten Modells kann man schreiben:

$$W_{pot} = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{C} \mathbf{x}. \quad (2.63)$$

Ein Gleichsetzen von **(2.62)** und **(2.63)** liefert

$$\int_A c_z(x, y) \cdot z(x, y)^2 dA = \mathbf{x}^T \mathbf{C}_{ers} \mathbf{x}. \quad (2.64)$$

Man schreibt man die Verformung des Kontinuums  $z(x, y)$  abhängig von den diskreten Verformungen  $\mathbf{x}$  auf

$$z(x, y) = \mathbf{H}^T \mathbf{x} \quad \text{und} \quad (2.65)$$

setzt **(2.65)** in **(2.64)** ein. Nach einigen Umformungen erhält man die Matrix der gesuchten Ersatzsteifigkeiten

$$\mathbf{C}_{ers} = \int_A c_z(x, y) \cdot \mathbf{H}(x, y) \cdot \mathbf{H}(x, y)^T dA. \quad (2.66)$$

Für  $z(x, y)$  kann man **(2.67)** bzw. **(2.68)** schreiben; unter der Voraussetzung, dass nur kleine Verdrehungen auftreten, so dass  $\sin(\varphi) \sim \varphi$  gilt:

$$z(x, y) = z + x \cdot \varphi_y - y \cdot \varphi_x \quad (2.67)$$

$$z(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & -y & x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{bmatrix}. \quad (2.68)$$

Ein Vergleich von **(2.65)** und **(2.68)** liefert

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 & -y & x \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 & -y & x \\ -y & y^2 & -x \cdot y \\ x & -x \cdot y & x^2 \end{bmatrix}. \quad (2.70)$$

Für konstantes  $c_z$  erhält man mit **(2.66)**

$$\mathbf{C}_{ers} = c_z \int_{l_x} \int_{l_y} \begin{bmatrix} 1 & -y & x \\ -y & y^2 & -x \cdot y \\ x & -x \cdot y & x^2 \end{bmatrix} dy dx \quad \text{bzw.} \quad (2.71)$$

$$\mathbf{C}_{ers} = c_z \cdot \begin{bmatrix} A & -A \cdot y_s & A \cdot x_s \\ -A \cdot y_s & I_{xx} & I_{xy} \\ A \cdot x_s & I_{xy} & I_{yy} \end{bmatrix}. \quad (2.72)$$

Hierbei ist  $A$  die Fläche, und  $I_{xx}$  sowie  $I_{yy}$  sind die Flächenträgheitsmomente um die  $x$ - bzw.  $y$ -Achse.

Legt man das diskrete Koordinatensystem in den Flächenschwerpunkt und wählt man außerdem Hauptkoordinaten, dann geht (2.72) über in

$$\mathbf{C}_{ers} = c_z \cdot \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & I_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & I_{yy} \end{bmatrix}. \quad (2.73)$$

Für die rechteckige Fläche mit konstant verteilter Steifigkeit ergeben sich somit die folgenden diskreten Ersatzsteifigkeiten für Hauptkoordinaten (Koordinatenrichtungen z. B. parallel zu den Rändern der Fläche) und ein Federelement im Flächenschwerpunkt (Flächenmitte):

$$\begin{bmatrix} c_{ers\_z} \\ c_{ers\_qx} \\ c_{ers\_qy} \end{bmatrix} = c_z \begin{bmatrix} l_x \cdot l_y \\ \frac{l_x \cdot l_y^3}{12} \\ \frac{l_y \cdot l_x^3}{12} \end{bmatrix}. \quad (2.74)$$

Für andere Richtungen verteilter Steifigkeiten gilt (2.47) entsprechend.

## 2.7.2 Baugründe

Baugründe sind ein Beispiel für gekoppelte verteilte Steifigkeiten, d. h. die Steifigkeitswirkungen in verschiedene Richtungen hängen voneinander ab.

Die hier angeführte Methode nach [27] beruht auf dem **Bettungszahlmodell nach Winkler** für die Steifigkeit und auf dem **Konzept nach Savinov** für die Dämpfung [28].

Bei diesem Modell wird für die Steifigkeit angenommen, dass unabhängig von der Form des Fundamentblocks elastische Kräfte nur an der Sohle des Fundamentes, nicht an den Seitenflächen auftreten. Weiter wird vorausgesetzt, dass die infolge der Fundamentbewegung auftretenden elastischen Sohlspannungen in einem Punkt der Sohlfläche nur von den Verschiebungen des Punktes abhängen und diesen direkt proportional sind.

Der Baugrund wird beschrieben durch die Bettungszahl  $C = C_z$  (Bodenpressung durch eine Vertikalverschiebung um eine Längeneinheit) sowie einem Dämpfungswert  $\Phi$ . Diese Werte werden aus experimentellen Daten oder anhand von Vorschriften aus Bodenart, Dichte- bzw. Konsistenzindex bestimmt.

Für Schubspannungen - durch horizontale Translationsverschiebungen hervorgerufen - gilt (Koordinaten und Bezeichnungen analog **Abb. 2.16**)

$$C_x = C_y = 0.7 \cdot C, \quad (2.75)$$

für Vertikalverschiebungen infolge einer Drehung der Fundamentsohle um eine horizontale Schwerachse der Sohlfläche gilt

$$C_\varphi = 2 \cdot C. \quad (2.76)$$

Für Schubspannungen infolge einer Drehung der Sohle um die vertikale Schwerachse gilt

$$C_\psi = 1.05 \cdot C. \quad (2.77)$$

Die Dämpfung des Baugrundes ist im Allgemeinen recht groß. Der Verlustfaktor  $d$  wird durch einen Dämpfungsbeiwert bei harmonischer Erregung

$$d = \Phi \cdot \omega_{err}, \quad (2.78)$$

bei Stoßanregung durch

$$d = \Phi \cdot \omega_{eig} \quad (2.79)$$

beschrieben.  $\omega_{err}$  ist die Erregerkreisfrequenz,  $\omega_{eig}$  die angeregte Eigenkreisfrequenz.

Streng genommen ist dieser Ansatz damit nur für mit einer einzigen Erregerfrequenz erregte Systeme oder für Systeme mit einem Freiheitsgrad zulässig. Für  $C$  sind Werte im Bereich  $C = 2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^3 \dots 14 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^3$  anzunehmen,  $\Phi$  liegt im Bereich  $\Phi = (0,002 \text{ s}) 0,004 \text{ s} \dots 0,008 \text{ s}$  (nach [27]).

Berechnet man auf dieser Grundlage eine Federmatrix für ein rechteckiges Blockfundament der Kantenlängen  $l_x$  (x-Richtung) und  $l_y$  (y-Richtung, **Abb. 2.16**) und leitet daraus eine einzelne Feder unter der Voraussetzung harmonischer Anregung mit der Frequenz  $f$  ab, so erhält diese Feder die Steifigkeiten

$$c_x = c_y = 0.7 \cdot C \cdot A \quad \text{und} \quad (2.80)$$

$$c_z = C \cdot A, \quad \text{mit} \quad (2.81)$$

$$A = l_x \cdot l_y \quad (\text{Fläche der Sohlplatte}). \quad (2.82)$$

Die Drehfedersteifigkeiten berechnen sich zu

$$c_{\varphi x} = 2 \cdot C \cdot I_{xx}, \quad (2.83)$$

$$c_{\varphi y} = 2 \cdot C \cdot I_{yy} \quad \text{und} \quad (2.84)$$

$$c_{\varphi z} = 1.05 \cdot C \cdot I_p, \quad (2.85)$$

wobei  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  und  $I_p$  die Flächenträgheitsmomente der Sohlplatte um die x-, y- und z-Achse sind (analog (2.72) bis (2.74) und  $I_p = I_{xx} + I_{yy}$ ).

Dabei wird vorausgesetzt, dass der Schwerpunkt der Feder mit dem Flächenschwerpunkt der Sohlfläche übereinstimmt.

Das für alle Verschiebungs- und Drehrichtungen gleiche Lehr'sche Dämpfungsmaß  $D$  berechnet sich zu

$$D = \frac{d}{2} = \Phi \cdot \pi \cdot f, \quad (2.86)$$

wobei für  $f$  entweder die dominierende Erregerfrequenz bei harmonischer Erregung oder die kleinste Eigenfrequenz bei Stoßanregung oder mehreren Erregerfrequenzen angesetzt werden kann. Im letzteren Fall wird damit die kleinstmögliche Dämpfung angesetzt, so dass man mit der Rechnung auf der sicheren Seite liegt. Im Zweifelsfall können Variantenrechnungen mit unterschiedlichen Dämpfungswerten helfen, die Größe des Fehlers abzuschätzen.

Das mit dem Programm gelieferte Testbeispiel Baugrundssimulation (s. Abschnitt 7.4.4) wurde [27] entnommen. Das Beispiel enthält eine so berechnete Baugrundfeder mit  $C = 1,2 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$ ,  $\Phi = 0,007 \text{ s}$  und  $f = 16,36 \text{ Hz}$ .

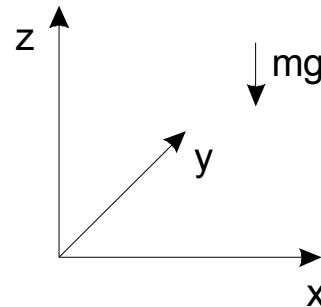
## 3 Grundlagen des Programms ISOMAG

### 3.1 Algorithmische Grundlagen des Programms

#### 3.1.1 Koordinatensysteme

##### 3.1.1.1 Globales Koordinatensystem (GK)

Im globalen Koordinatensystem markiert  $z$  die senkrechte Richtung. In ihr wirkt die Gewichtskraft. Die Achsen bilden ein Rechtssystem und sind wie folgt orientiert:  $x$  nach rechts,  $y$  nach hinten,  $z$  nach oben (vgl. **Abb. 3.1**). Damit entspricht das Koordinatensystem der üblichen Orientierung im Raum. Es wird auch von verschiedenen Isolatorherstellern (z. B. [19]) benutzt.

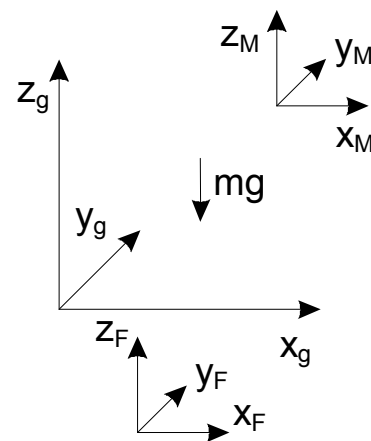


**Abb. 3.1** Globales Koordinatensystem

Im globalen Koordinatensystem sind die Bewegung von Maschine (Index 1, Koordinaten 1 bis 6) und Fundament (Index 2, Koordinaten 7 bis 12) sowie der Umgebung (Index 3, Koordinate 13) definiert (**3.3**).

##### 3.1.1.2 Maschinenkoordinatensystem (MK) und Fundamentkoordinatensystem (FK)

Im Maschinenkoordinatensystem werden die Lage der zur Maschine gehörenden Teilkörper sowie der mit der Maschine verbundenen Federelemente und Erregungen beschrieben. Im Fundamentkoordinatensystem wird die Lage der zum Fundament gehörenden Teilkörper und Erregungen sowie der mit Fundament und Umgebung verbundenen Federelemente beschrieben. Beide Koordinatensysteme können gegenüber dem globalen Koordinatensystem verschoben sein (Verdrehung ist ausgeschlossen). Solange es vom Anwender nicht explizit geändert wird, liegen GK, MK und FK übereinander. Damit kann der Anwender bei der Modellierung quasi mit einem Koordinatensystem arbeiten, das den Zusammenbau der Struktur ohne "Gewöhnungsprobleme" ermöglicht.

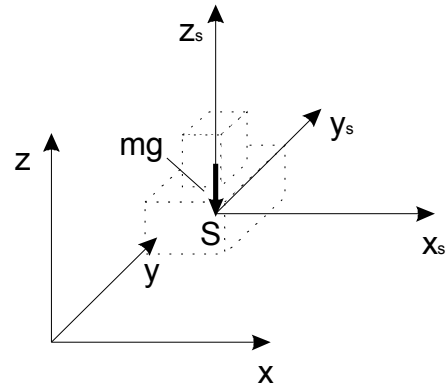


**Abb. 3.2** Koordinatensysteme für Maschine und Fundament

Sollen dagegen alle zur Maschine oder alle zum Fundament gehörenden Objekte (in MK bzw. FK beschrieben) eine neue Position einnehmen, ist dies z. B. über eine entsprechende Verschiebung der Koordinatensysteme realisierbar.

### 3.1.1.3 Schwerpunktkoordinatensystem (SK)

Es sind zwei Schwerpunktkoordinatensysteme definiert. Das für den Starrkörper Maschine trägt den Index 1, während das für den Starrkörper Fundament den Index 2 hat. Die Schwerpunktkoordinatensysteme werden aus dem Maschinen- bzw. Fundamentkoordinatensystem durch reines Verschieben in den Massenschwerpunkt des jeweiligen Starrkörpers abgeleitet. Somit sind die entsprechenden Achsen beider Systeme parallel und gleichgerichtet (vgl. **Abb. 3.3**). Die SK-Lage wird vom Programm ermittelt und kann bei Bedarf grafisch dargestellt werden.



**Abb. 3.3** Schwerpunktkoordinatensystem

### 3.1.1.4 Trägheitshauptachsenkoordinatensystem (TK)

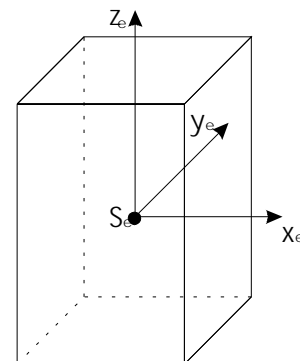
Trägheitshauptachsenkoordinatensysteme werden durch reine Drehung der Schwerpunktkoordinatensysteme in die Trägheitshauptachsenlage erzeugt. Somit liegt der Ursprung der im Folgenden verwendeten Trägheitshauptachsenkoordinatensysteme im jeweiligen Massenschwerpunkt. Die Trägheitshauptachsenlage zeichnet sich dadurch aus, dass die Drehträgheiten um diese Achsen Extremwerte annehmen und die Deviationsmomente Null werden. Damit wird die Massenmatrix zur Diagonalmatrix. Neben den Trägheitshauptachsensystemen für die Maschine (1) und das Fundament (2) wird vom Programm noch das für Maschine und Fundament (3) ermittelt. Der Anwender kann sich das Ergebnis anzeigen lassen.

### 3.1.1.5 Hauptkoordinatensystem (HK)

In Hauptkoordinaten ist das System entkoppelt. Jede Gleichung ist unabhängig von allen anderen Gleichungen. Alle Matrizen (Trägheit, Steifigkeit und Dämpfung) haben Diagonalf orm. Dieses System wird auch als modales System bezeichnet. Es wird per Koordinatentransformation erzeugt und programmintern für die Berechnung der Lösungen im Zeit- und Frequenzbereich benutzt.

### 3.1.1.6 Elementkoordinatensystem (EK)

Jeder Grundkörper (jedes Objekt) besitzt ein körperbezogenes Elementkoordinatensystem. Es liegt im Schwerpunkt des Körpers (Objektes, vgl. **Abb. 3.4**). In ungedrehter Lage sind seine Achsen denen des globalen Systems (und damit auch denen des Schwerpunktkoordinatensystems) parallel.

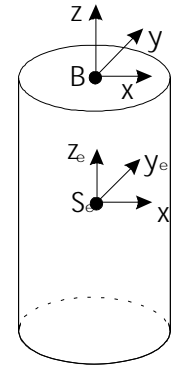


**Abb. 3.4** Elementkoordinatensystem



### 3.1.1.7 Bezugskoordinatensystem (BK)

Zur besseren Beschreibung der Lage eines Objektes bezüglich des Gesamtsystems können Objekte über einen Bezugspunkt verfügen. Auf diesen beziehen sich Objektmanipulationen. Das BK lässt sich durch reine Verschiebung in das EK überführen (**Abb. 3.5**). Ist für ein Objekt kein spezieller Bezugspunkt ausgewiesen, fallen BK und EK zusammen.



**Abb. 3.5** Bezugskoordinatensystem

### 3.1.2 Koordinatentransformationen

Die Eigenschaften der Objekte lassen sich in vielen Koordinatensystemen darstellen und beschreiben. Dabei eignen sich die einzelnen Koordinatensysteme für verschiedene Teilaufgaben unterschiedlich gut. Will man die Vorteile spezieller Koordinatensysteme nutzen, muss man mehrere Koordinatensysteme zulassen. Beschreibt man beispielsweise die Trägheits- und Steifigkeitseigenschaften der Objekte zweckmäßig in Elementkoordinaten, löst man die Bewegungsgleichungen besser in Hauptkoordinaten, da in diesem System die Gleichungen entkoppelt sind. Per Koordinatentransformation lassen sich die in einem Koordinatensystem dargestellten Zusammenhänge auf ein anderes umrechnen.

Für die Transformation der Bewegungsgrößen vom Elementkoordinatensystem EK auf das globale Koordinatensystem GK kann man beispielsweise schreiben:

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{T}_{eg} \mathbf{x}_g. \quad (3.1)$$

Dabei enthält der Vektor  $\mathbf{x}_e$  die Verformungskomponenten (die drei Verschiebungen  $x$ ,  $y$  und  $z$  sowie die drei Verdrehungen  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  und  $\varphi_z$ ) in Elementkoordinaten:

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ \varphi_{x_e} \\ \varphi_{y_e} \\ \varphi_{z_e} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

und der Vektor  $\mathbf{x}_g$  die entsprechenden Größen in GK:

$$x_g = \begin{bmatrix} x_{g1} \\ y_{g1} \\ z_{g1} \\ \varphi_{xg1} \\ \varphi_{yg1} \\ \varphi_{zg1} \\ x_{g2} \\ y_{g2} \\ z_{g2} \\ \varphi_{xg2} \\ \varphi_{yg2} \\ \varphi_{zg2} \\ z_{g3} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Da die Elementkoordinaten die Dimension 6 haben, in GK dagegen 13 Koordinaten definiert sind, muss die Transformationsmatrix  $\mathbf{T}_{eg}$  die Dimension 6x13 haben. Inhaltlich muss neben der eigentlichen Koordinatentransformation (Berücksichtigung von Drehung und Abstand) noch eine Zuordnung der Elementkoordinaten zu den globalen Koordinaten erfolgen. Die Zuordnung richtet sich danach, mit welchem Körper die Elemente verbunden sind. Sind sie mit mehreren verbunden, muss für jeden Anschluss eine Transformation erfolgen.

Gemäß Abschnitt 3.1 lassen sich die Koordinatensysteme durch Verschiebungen und/oder Verdrehungen ineinander überführen. In der Matrix (3.4) sind zunächst nur diese beiden Anteile berücksichtigt, wobei die Verdrehung der Untermatrix  $\mathbf{P}$  und die Verschiebungen der Untermatrix  $\mathbf{S}$  zugeordnet werden können:

$$\mathbf{T}_{eg\,teil} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{eg} & \mathbf{P}_{eg}\mathbf{S}_{eg} \\ 0 & \mathbf{P}_{eg} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dabei wird das Elementkoordinatensystem so gedreht, dass seine Achsen denen des globalen Koordinatensystems parallel und richtungsgleich sind. Die Matrix  $\mathbf{P}_{eg}$  (Dimension 3x3) enthält die die Drehung beschreibenden, so genannten Richtungskosinus. Sie lassen sich aus den im Programm eingegebenen Drehwinkeln um die einzelnen Achsen (PhiX, PhiY und PhiZ, vgl. Abschnitt 4.5.3.2) berechnen (z. B. gemäß [24]). Die sich anschließende Verschiebung beschreibt die Matrix  $\mathbf{S}_{eg}$  (Dimension 3x3). Sie enthält die ebenfalls in Abschnitt 4.5.3.2 eingegebenen Abstände X, Y, und Z:

$$\mathbf{S}_{eg} = \begin{bmatrix} 0 & Z & -Y \\ -Z & 0 & X \\ Y & -X & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

(3.5) gilt für den Standardfall, dass MK, FK und GK zusammenfallen. Strenggenommen werden die Objekte bezüglich MK oder FK beschrieben (**Abb. 4.3**), so dass im allgemeinen Fall noch eine weitere Transformation erforderlich wird.

$\mathbf{T}_{eg}$  (Dimension 6x13) wird aus der Matrix  $\mathbf{T}_{eg\ teil}$  (Dimension 6x6) gebildet - je nachdem, mit welchen Starrkörpern die Elemente verbunden sind. Sie setzt sich aus 2 Matrizen 6x6 für die Transformation auf die Starrkörper 1 und 2 sowie einem Spaltenvektor 6x1 für die Transformation auf die elastische Umgebung 3 zusammen:

$$\mathbf{T}_{eg} [6 \times 13] = \left[ \left[ 6 \times 6 \right] \quad \left[ 6 \times 6 \right] \quad \left[ 6 \times 1 \right] \right] \quad (3.6)$$

Da die Umgebung nur in z elastisch angenommen wird, genügt hierfür ein Vektor. Dieser Spaltenvektor wird bei Bedarf aus  $\mathbf{T}_{eg\ teil}$  gebildet und ist die dritte Spalte (z-Verschiebung in globaler Richtung) dieser Matrix.

a) Element ist mit Körper 1 (Maschine) und starrer Umgebung verbunden

$$\mathbf{T}_{eg} = \left[ \mathbf{T}_{eg\ teil} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \right] \quad (3.7)$$

b) Element ist mit Körper 1 (Maschine) und Körper 2 (Fundament) verbunden

$$\mathbf{T}_{eg} = \left[ \mathbf{T}_{eg\ teil} \quad -\mathbf{T}_{eg\ teil} \quad \mathbf{0} \right] \quad (3.8)$$

c) Element ist mit Körper 1 (Maschine) und elastischer Umgebung 3 verbunden

$$\mathbf{T}_{eg} = \left[ \mathbf{T}_{eg\ teil} \quad \mathbf{0} \quad -\left[ \mathbf{T}_{eg\ teil} \right]_{\cdot,3} \right] \quad (3.9)$$

d) Element ist mit Körper 2 (Fundament) und elastischer Umgebung 3 verbunden

$$\mathbf{T}_{eg} = \left[ \mathbf{0} \quad \mathbf{T}_{eg\ teil} \quad -\left[ \mathbf{T}_{eg\ teil} \right]_{\cdot,3} \right] \quad (3.10)$$

e) Element ist mit Körper 2 (Fundament) und starrer Umgebung verbunden

$$\mathbf{T}_{eg} = \left[ \mathbf{0} \quad \mathbf{T}_{eg\ teil} \quad \mathbf{0} \right] \quad (3.11)$$

f) Element ist mit elastischer und starrer Umgebung verbunden

$$\mathbf{T}_{eg} = \left[ \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \left[ \mathbf{T}_{eg\ teil} \right]_{\cdot,3} \right] \quad (3.12)$$

Beispiele für den Fall f sind die elastische Umgebung selbst, aber auch z. B. Krafterregungen, die auf die elastische Umgebung wirken.

Es können mehrere Transformationen nacheinander ausgeführt werden. Das Produkt der einzelnen Transformationsmatrizen ist gleich der Matrix, die die gesamte Transformation beschreibt, z. B.:

$$\mathbf{x}_g = \mathbf{T}_{gs} \mathbf{x}_s. \quad (3.13)$$

Gleichung (3.13) in Gleichung (3.1) eingesetzt:

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{T}_{eg} \mathbf{T}_{gs} \mathbf{x}_s \quad \text{oder} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{T}_{es} \mathbf{x}_s \quad \text{mit} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{T}_{es} = \mathbf{T}_{eg} \mathbf{T}_{gs}. \quad (3.16)$$

Die Transformation von Element- auf globale Koordinaten lässt sich gleichfalls aus zwei Koordinatentransformationen zusammensetzen. Zuerst werden die Elementkoordinaten auf das Maschinen- bzw. Fundamentkoordinatensystem und anschließend auf das globale Koordinatensystem transformiert.

Bei der Transformation auf Schwerpunktkoordinaten ist darauf zu achten, dass Index 1 auf den Schwerpunkt des Körpers 1 (Maschine) und Index 2 auf den Schwerpunkt des Körpers 2 (Fundament) transformiert werden.

$$\mathbf{T}_{gs} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{S}_{gs1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{S}_{gs2} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Mit den hier für die Verformungen abgeleiteten Transformationsmatrizen lassen sich auch andere Beziehungen und Größen umrechnen, unter anderem die Kräfte und Momente:

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{T}_{eg}^T \mathbf{F}_e, \quad \text{mit} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{F}_e = [F_{ex} \quad F_{ey} \quad F_{ez} \quad M_{ex} \quad M_{ey} \quad M_{ez}]^T \quad \text{und} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{F}_g = [F_{gx1} \quad F_{gy1} \quad F_{gz1} \quad M_{gx1} \quad M_{gy1} \quad M_{gz1} \quad F_{gx2} \quad F_{gy2} \quad F_{gz2} \quad M_{gx2} \quad M_{gy2} \quad M_{gz2} \quad F_{gz3}]^T \quad (3.20)$$

oder Parameter wie die Steifigkeiten:

$$\mathbf{C}_g = \mathbf{T}_{eg}^T \mathbf{C}_e \mathbf{T}_{eg}. \quad (3.21)$$

### 3.1.3 Berechnung der Trägheitseigenschaften

Um die Trägheitseigenschaften des zu isolierenden Objektes (oder des Fundaments) besser beschreiben zu können, unterteilt man es in Teilkörper. Die Teilkörper zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine einfache Geometrie haben (Quader, Zylinder,

Dreikant oder Kugel) oder dass ihre Trägheitseigenschaften bekannt und sie somit leicht zu beschreiben sind. Im Programm werden dann für die aus Teilkörpern zusammengesetzten starren Körper Maschine und Fundament sowie für Maschine plus Fundament zusammen (unter Annahme starrer Bindung) die Trägheitseigenschaften berechnet.

Ist die Einstellung "Automatisch neu berechnen" (siehe **4.4.4.3**) aktiv, werden nach jeder Manipulation, die Einfluss auf die Trägheitsmatrix des Systems hat (z. B. Werteingabe, Drehen, Verschieben, Hinzufügen oder Löschen von Teilkörpern), Trägheitsmatrix, Schwerpunktlage, Hauptträgheiten und Lage der Hauptträgheitsachsen neu berechnet. Die Lage des Trägheitshauptachsensystems wird grafisch dargestellt bzw. die Darstellung wird aktualisiert.

### 3.1.3.1 Berechnung der Elementträgheitsmatrizen

Zunächst werden die Trägheitseigenschaften für das Element berechnet. Aufgrund der ausgezeichneten Lage der Elementkoordinatensysteme genügt es bei Quader, Zylinder und Kugel, die Elementdrehträgheitsmomente  $J_{exx}$ ,  $J_{eyy}$  und  $J_{ezz}$  sowie die Elementmasse  $m_e$  zu berechnen. Für den Dreikant muss zusätzlich noch das Deviationsträgheitsmoment  $J_{exy}$  ermittelt werden. Es gelten die in **Tab. 7.2** zusammengestellten Beziehungen, wobei die nicht aufgeführten Deviationsträgheitsmomente gleich Null sind. Für CAD Import Körper oder das frei definierte Prisma wird die komplett besetzte Trägheitsmatrix berechnet, kann aber auch manuell eingegeben werden.

Bei direkter Eingabe der Masse oder von Masse und Drehträgheitsmomenten erfolgt die weitere Rechnung mit den eingegebenen Werten. Für die gegebenen Größen entfällt damit eine Berechnung gemäß **Tab. 7.2**.

Die Elementmassenmatrix  $\mathbf{M}_e$  ergibt sich also wie folgt:

$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} m_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{exx} & J_{exy} & J_{exz} \\ 0 & 0 & 0 & J_{eyx} & J_{eyy} & J_{eyz} \\ 0 & 0 & 0 & J_{ezx} & J_{ezy} & J_{ezz} \end{bmatrix} \quad (3.22).$$

### 3.1.3.2 Aufstellen der Massenmatrix in Schwerpunktkoordinaten

Die Aufsummierung der Elementmatrizen zur Massenmatrix erfolgt akkumulierend in Schwerpunktkoordinaten der Maschine bzw. des Fundaments. Da sich mit jeder hinzukommenden Masse die Lage des Schwerpunktes ändert, wird dieser zuerst berechnet. Er lässt sich aus der bisherigen Masse und der Masse des aufzusummierenden Teilkörpers sowie dem Abstand beider Massenschwerpunkte berechnen. Mit dem neuen Schwerpunkt ist auch die Lage des Schwerpunktkoordinatensystems neu definiert. Gemäß den unter Abschnitt **3.1.2** vorgestellten Transformationsbeziehungen

gen lassen sich sowohl die Element-Massenmatrix als auch die bisherige Massenmatrix auf das neue SK transformieren und aufsummieren.

Die bezüglich SK aufgestellten Massenmatrizen haben folgendes spezielle Aussehen:

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} m_{ges} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{ges} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ges} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{sxx} & J_{sxy} & J_{sxz} \\ 0 & 0 & 0 & J_{syx} & J_{syy} & J_{syx} \\ 0 & 0 & 0 & J_{szx} & J_{szy} & J_{szz} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

### 3.1.3.3 Berechnung der Trägheitshauptachsen

Die Berechnung der Trägheitshauptachsenlage sowie der Hauptträgheiten kann erfolgen, indem die Massenmatrizen  $\mathbf{M}_s$  auf Diagonalfom transformiert werden. Dies führt auf ein Eigenwertproblem, wofür in der Literatur verschiedene Algorithmen bekannt sind (z. B. [25]). **ISOMAG** setzt für die numerische Lösung Verfahren von Martin, Parlett, Peters, Reinsch und Wilkinson ein [26].

Da die Drehträgheiten in  $\mathbf{M}_s$  nicht mit den Massen gekoppelt sind und außerdem die Masse für alle drei Verschiebekoordinaten gleich  $m$  ist, genügt es, die 3x3 Untermatrix der Drehträgheiten zu transformieren. Mit

$$\mathbf{M}_{s22} = \begin{bmatrix} J_{sxx} & J_{sxy} & J_{sxz} \\ J_{syx} & J_{syy} & J_{syx} \\ J_{szx} & J_{szy} & J_{szz} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

lautet die Eigenwertaufgabe

$$(\mathbf{M}_{s22} - \lambda_i \mathbf{E})\mathbf{V} = \mathbf{0}. \quad (3.25)$$

Die orthonormierte Matrix  $\mathbf{V}$  aus Gleichung (3.25) ist gleich der Matrix der Richtungskosinus  $\mathbf{P}_{st}$ , welche die Drehung vom Schwerpunktkoordinatensystem in das Trägheitshauptachsensystem beschreibt. Die Eigenwerte  $\lambda_i$  aus (3.25) sind gleich den Hauptträgheiten. Damit ergibt sich folgende Massenmatrix  $\mathbf{M}_t$  für die Trägheitshauptachsenlage:

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} m & & & & \\ & m & & & \mathbf{0} \\ & & m & & \\ & & & \lambda_1 & \\ \mathbf{0} & & & & \lambda_2 \\ & & & & & \lambda_3 \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

So sind mit der Schwerpunktlage, der Matrix der Richtungskosinus  $\mathbf{P}_{st}$  und der Diagonalen der Matrix  $\mathbf{M}_t$  die Hauptträgheitseigenschaften gefunden. Aus der Matrix der Richtungskosinus lassen sich die etwas anschaulicheren Winkel ermitteln, die angeben, wie weit nacheinander um die einzelnen Achsen gedreht werden muss, um das SK in das TK zu überführen (vgl. Abschnitt 4.8.1).

Die Eigenwertaufgabe wird einmal für die Maschine (Index 1) und das Fundament (Index2) gelöst. Mit der Ersatzmasse der Umgebung  $m_3$  und (3.26) ergibt sich für das System folgende Gesamtmassenmatrix  $\mathbf{M}_{tges}$  für die Trägheitshauptachsenlage:

$$\mathbf{M}_{tges} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{t1} & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{t2} & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Zusätzlich werden die Trägheitsachsen für Maschine und Fundament (unter Annahme starrer Kopplung) berechnet und ausgegeben.

### 3.1.4 Berechnung der Steifigkeitseigenschaften

Ist "Automatisch neu berechnen" (siehe 4.4.4.3) aktiv, werden nach jeder Manipulation, die Einfluss auf die Steifigkeitsmatrix des Systems hat, z. B. Abschluss der Werteingabe durch Schließen des Parameterdialogs, Drehen, Verschieben, Hinzufügen oder Löschen von Federelementen, Steifigkeitsmatrix, Federschwerpunkt, Hauptverschiebesteifigkeiten sowie die Lage der Hauptsteifigkeitsachsen neu berechnet. Die Lage des Feder-Hauptachsensystems wird grafisch dargestellt bzw. die Darstellung wird aktualisiert.

#### 3.1.4.1 Allgemeines zu den Steifigkeitsmatrizen

Die Elementsteifigkeitsmatrix wird im Elementkoordinatensystem aufgebaut. Das Elementkoordinatensystem liegt im elastischen Zentrum der Aufstellelemente, welches sich im Allgemeinen in deren Mitte befindet und somit nicht mit dem Bezugskordinatensystem (Anlenkpunkt) identisch ist. Demzufolge ist zuerst die Lage des elastischen Zentrums bzw. des Objektschwerpunktes bezüglich MK bzw. FK (je nachdem, ob die Isolatoren bezüglich Maschine oder Fundament definiert werden, **Abb. 4.3**) zu berechnen. Für den Standardfall, dass MK, FK und GK zusammenfallen, gilt:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} + \mathbf{P}_{eg} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{l_z}{2} \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Im elastischen Zentrum sind die Kraft-Verformungsbeziehungen entkoppelt, und die Steifigkeitsmatrix ist eine Diagonalmatrix. Sie hat folgendes Aussehen:

$$\mathbf{C}_e = \begin{bmatrix} c_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{\varphi x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\varphi y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\varphi z} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Falls keine Kennlinien gegeben sind, werden die im Programm eingegebenen bzw. voreingestellten Werte in die Matrix eingetragen.

Liegen Kennlinien vor, muss die Steife in Abhängigkeit der Belastung gewählt werden. Steife und innere Belastung beeinflussen sich gegenseitig. Im Programm wird die Steifigkeitsmatrix iterativ aufgestellt.

Im Allgemeinen sind Fundamentierungen statisch unbestimmt. Es werden also mehr Federelemente eingesetzt bzw. mit den Federn mehr Lagerungen realisiert als Freiheitsgrade vorhanden sind. Damit hängen die Belastungen in den einzelnen Elementen von den Steifigkeitsverhältnissen im System ab. Die Iteration muss also die Systemsteifigkeitsmatrix mit einbeziehen. Das heißt, die Elementsteifigkeitsmatrix  $\mathbf{C}_e$  und Systemsteifigkeitsmatrix in globalen Koordinaten  $\mathbf{C}_g$  werden abwechselnd aufgebaut und stehen beide am Ende der Iteration zur Verfügung.

Da die Iteration gleichzeitig die gesuchten statischen Verformungen und Belastungen liefert, wird sie stets wenigstens einmal durchlaufen, selbst wenn mit konstanten Steifigkeitswerten gearbeitet wird.

Bei nichtlinearen Steifigkeiten ist außerdem zu beachten, dass für die Statik eine andere Steifigkeitsmatrix als für die Dynamik benötigt wird.

Die Steifigkeitsmatrix der Statik soll den Zusammenhang zwischen statischer Last und statischer Verformung beschreiben. Deshalb muss in diesem Fall mit der so genannten "effektiven Steifigkeit"  $C_{eff}$  gerechnet werden:

$$C_{eff} = \frac{F}{s}. \quad (3.30)$$

Für die Dynamik bzw. das Schwingverhalten ist die tatsächliche Steife, also der Anstieg der F-s-Kennlinie (Kraft-Weg-Kennlinie der Feder) im jeweiligen Arbeitspunkt wichtig. Für Schwingungen mit kleinen Amplituden um die statische Ruhelage kann



angenommen werden, dass die Lage des Arbeitspunktes konstant ist und durch die statischen Verhältnisse bestimmt wird. Außerdem kann die Steife für kleine Verformungsänderungen linear angenommen werden. Die um den Arbeitspunkt linearisierte Steife  $C_{lin}$  ergibt sich zu:

$$C_{lin} = \frac{dF(F_{stat})}{ds(s_{stat})}. \quad (3.31)$$

### 3.1.4.2 Aufstellen der Steifigkeitsmatrizen für die statische Rechnung

Zuerst werden die Matrizen für die Statik unter Verwendung der effektiven Steife gemäß (3.30) iterativ aufgestellt. Das Programm geht dabei wie im Anhang in **Abb. 7.1** dargestellt vor.

### 3.1.4.3 Wenn sich die Matrix nicht invertieren lässt...

Wenn das Modell statisch unbestimmt ist oder eben ist oder nur einen Freiheitsgrad hat, lässt sich die komplette 13x13 Steifigkeitsmatrix nicht invertieren. Deshalb wird ein Verfahren benutzt, das die Matrix  $\mathbf{C}$  invertiert, soweit dies möglich ist. Die teilinvertierte Matrix  $\mathbf{K}$  bzw. teilt man wie folgt in Untermatrizen ein:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

$\mathbf{K}_{11}$  ist die Untermatrix, für die bereits ein Austausch erfolgte, die Hauptdiagonale von  $\mathbf{K}_{22}$  ist mit Nullen besetzt, so dass kein weiterer Austausch möglich ist. Das teilinvertierte Gleichungssystem sieht wie folgt aus:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}, \quad (3.33)$$

wobei der Vektor  $\mathbf{x}$  die Verformungen und der Vektor  $\mathbf{F}$  die äußeren Belastungen enthält.

Eine Lösung findet sich, wenn in den Koordinatenrichtungen  $\mathbf{x}_2$  ohnehin keine Verformungen auftreten. Dann muss  $\mathbf{F}_2 = \mathbf{K}_{21} \cdot \mathbf{F}_1$  erfüllt sein. In diesem Fall berechnet sich  $\mathbf{x}_1$  aus  $\mathbf{K}_{11} \cdot \mathbf{F}_1$  und  $\mathbf{x}_2$  ist gleich  $\mathbf{0}$ . Damit sind die gesuchten Verformungen  $\mathbf{x}$  gefunden. Das Modell ist dann beispielsweise eben oder eindimensional.

Ist  $\mathbf{F}_2 \neq \mathbf{K}_{21} \cdot \mathbf{F}_1$ , ist das System statisch unbestimmt und eine entsprechende Fehlermitteilung erscheint. Die Rechnung wird abgebrochen und der Anwender erhält die Möglichkeit, das System zu korrigieren.

### 3.1.4.4 Berechnung der Hauptverschiebesteifigkeiten sowie deren Lage und Richtung

Die Hauptverschiebesteifigkeiten werden ausgehend von der statischen Steifigkeitsmatrix berechnet, da sie dazu verwendet werden sollen, Maschine und Fundament für den statischen Fall auszurichten (vgl. **4.8.1.2**).

Allgemein erhält man Richtung und Größe der Hauptverschiebesteifigkeiten, indem man nach **[10]** folgende Eigenwertaufgabe löst:

$$(\mathbf{C}_{0i} - \lambda_j \mathbf{E})\mathbf{V} = \mathbf{0}. \quad (3.34)$$

Die Eigenwerte  $\lambda_j$  sind gleich den Hauptverschiebesteifigkeiten, die Matrix der Eigenvektoren  $\mathbf{V}$  enthält die Richtungskosinus (evtl. nach erfolgter Orthonormierung), die die Winkellage der Hauptverschiebesteifigkeiten bezüglich des globalen Koordinatensystems angeben.

Die Matrix  $\mathbf{C}_{0i}$  ist eine 3x3 Matrix und kann aus Untermatrizen der globalen Steifigkeitsmatrix **(3.35)** gewonnen werden.

$$\mathbf{C}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{01} & \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{\dots} & \mathbf{C}_{\dots} & c_{\dots} \\ \mathbf{C}_{11}^T & \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{\dots} & \mathbf{C}_{\dots} & c_{\dots} \\ \mathbf{C}_{\dots}^T & \mathbf{C}_{\dots}^T & \mathbf{C}_{02} & \mathbf{C}_{12} & c_{\dots} \\ \mathbf{C}_{\dots}^T & \mathbf{C}_{\dots}^T & \mathbf{C}_{12}^T & \mathbf{C}_{22} & c_{\dots} \\ c_{\dots} & c_{\dots} & c_{\dots} & c_{\dots} & c_{33} \end{bmatrix}. \quad (3.35)$$

Soll die Maschine (und mit ihr starr verbundene Komponenten) ausgerichtet werden, sind die an der Maschine angeschlossenen Verschiebesteifigkeiten von Interesse. Sie finden sich in der Teilmatrix  $\mathbf{C}_{01}$  wieder (in  $\mathbf{C}_{01}$  sind alle definierten Verschiebesteifigkeiten zwischen Maschine und Fundament, zwischen Maschine und starrer Umgebung sowie zwischen Maschine und elastischer Umgebung enthalten). Zur Berechnung der Hauptsteifigkeiten für die Maschine wird also

$$\mathbf{C}_{0i} = \mathbf{C}_{01} \quad (3.36)$$

in **(3.34)** eingesetzt.

Zur Ausrichtung des Fundaments werden die zwischen Fundament und Umgebung definierten Verschiebesteifigkeiten benötigt. Man erhält sie aus  $\mathbf{C}_{02}$ , allerdings müssen von  $\mathbf{C}_{02}$  noch die mit der Maschine verbundenen Steifigkeiten abgezogen werden:

$$\mathbf{C}_{0i} = \mathbf{C}_{02} - \mathbf{C}_{01} \quad (3.37)$$

$\mathbf{C}_{0i}$  nach **(3.7)** enthält also alle definierten Verschiebesteifigkeiten zwischen Fundament und starrer Umgebung sowie zwischen Fundament und elastischer Umgebung. Mit ihr werden die Hauptsteifigkeiten für das Fundament nach **(3.34)** berechnet.

Treten bei der Lösung von (3.34) Eigenwerte gleich Null auf, sind die entsprechenden Hauptsteifigkeiten gleich Null - das System kann in diesen Richtungen keine Belastungen aufnehmen. Da bereits eine statische Prüfung erfolgte (Abschnitt 3.1.4.3), treten in diesen Richtungen auch keine Belastungen auf. Das Modell ist also eben oder eindimensional.

Bisher sind Größe ( $\lambda$ ) und Richtung ( $\mathbf{V}$ ) der Hauptsteifigkeiten bekannt. Um sie grafisch darstellen zu können, wird jeweils noch ein Punkt benötigt, durch den sie verlaufen. Diesen Punkt erhält man aus den so genannten Abstandsvektoren  $\mathbf{a}_j$ , die sich nach [10] aus folgendem Kreuzprodukt ergeben:

$$\mathbf{a}_j = \frac{\mathbf{v}_j \times (\mathbf{C}_{ii}^T \cdot \mathbf{v}_j)}{\lambda_j \mathbf{v}_j^2} \quad (3.38)$$

Die Vektoren  $\mathbf{v}_j$  sind dabei die Eigenvektoren, also die Spalten der Matrix  $\mathbf{V}$  aus Gleichung (3.34). Die Abstandsvektoren werden nur für  $\lambda_j > 0$  benötigt und berechnet. Für die Maschine wird  $\mathbf{C}_{ii}^T = \mathbf{C}_{11}^T$  gesetzt, für das Fundament  $\mathbf{C}_{ii}^T = \mathbf{C}_{12}^T$ .

#### 3.1.4.5 Berechnung des Federungsmittelpunktes

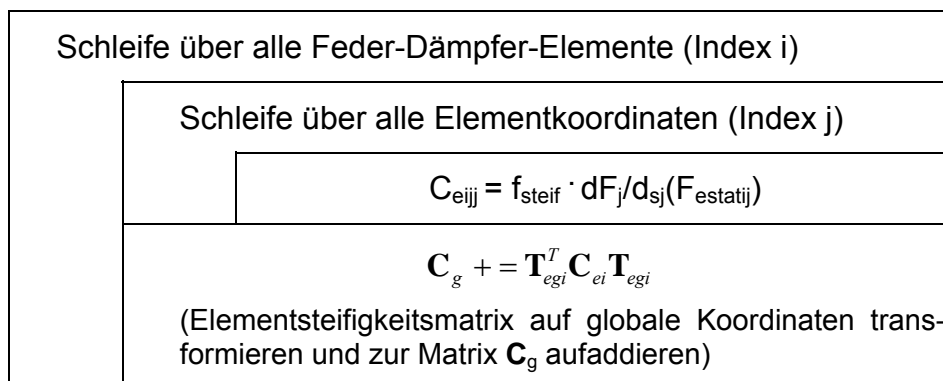
Ein Federungsmittelpunkt existiert nur, wenn es einen gemeinsamen Schnittpunkt der Richtungen der Hauptsteifigkeiten gibt.

Die Berechnung dieses Schnittpunktes führt auf ein Gleichungssystem. Ist es lösbar, existiert der Schnittpunkt. Benutzt man wieder ein Lösungsverfahren, das eine teilweise Invertierung der Matrix zulässt (vgl. Abschnitt 3.1.4.3), bekommt man auch einen Schnittpunkt für ebene Modelle.

Ein Federungsmittelpunkt wird für die Maschine und ein weiterer für das Fundament berechnet (analog Hauptverschiebesteifigkeiten).

#### 3.1.4.6 Berechnung der Steifigkeitsmatrix für die dynamische Rechnung

Sind die Steifigkeiten nichtlinear, unterscheiden sich die Steifigkeitsmatrizen für die statische und dynamische Rechnung (Abschnitt 3.1.4.1). Die dynamische Steifigkeitsmatrix wird gemäß **Abb. 3.6** aufgestellt.



**Abb. 3.6** Aufstellung der Steifigkeitsmatrix für die dynamische Rechnung

Der Faktor " $f_{\text{steif}}$ " berücksichtigt näherungsweise die Verfestigung elastischer Materialien bei höheren Beanspruchungsgeschwindigkeiten (Trägheit, Kriechverhalten des Materials). Er ist das Verhältnis der Steife bei dynamischer Beanspruchung zur Steife im statischen Fall.

Bei Berücksichtigung der Steifigkeit des Aufstellortes wird dessen Steifigkeit  $c_3$  dem Element  $\mathbf{C}_{g[13,13]}$  additiv zugeschlagen.

### 3.1.5 Statik

Die statischen Belastungen  $\mathbf{F}_{\text{estati}}$  und Verformungen  $\mathbf{x}_{\text{ei}}$  in den Aufstellelementen wurden bereits beim Aufstellen der Steifigkeitsmatrix gemäß Punkt 3.1.4.2 berechnet. Die dort bezüglich des globalen Koordinatensystems ermittelten Verformungen  $\mathbf{x}_g$  lassen sich mit Transformationsbeziehungen analog Abschnitt 3.1.2 auf jeden beliebigen Punkt im System umrechnen, so z. B. auch auf die Schwerpunkte. Auch der bezüglich des globalen Systems berechnete Kraftvektor  $\mathbf{F}_g$  kann auf andere Punkte transformiert werden. Man erhält dann die Summe aller eingeleiteten äußeren Kräfte, die im statischen Fall betragsgleich den Reaktionskräften (Kräfte in den Aufstellelementen) sind - bezogen auf diesen Punkt.

Außerdem wird in allen Feder-Dämpfer-Elementen (und in jeder Koordinatenrichtung des Federtyps) geprüft, ob die eingegebenen zulässigen Werte für Belastung und Verformung eingehalten werden. Eine Prüfung erfolgt nur, wenn wenigstens ein Grenzwert (Maximum oder Minimum) ungleich Null ist. Sind beide Grenzwerte Null, wird davon ausgegangen, dass für diese Belastungsrichtung keine Beschränkung existiert (vgl. **Abb. 7.2**).

Im Programm kann eingestellt werden, ob die statischen Verformungen der Isolatoren berechnet werden sollen. Besonders für moderne Anlagen mit automatischer Niveauregulierung ist dieses Feature sinnvoll, weil die statische Verformung der Isolatoren dort automatisch ausgeglichen wird.

### 3.1.6 Eigenfrequenzen und Schwingformen

Berechnet werden die Eigenfrequenzen und Schwingformen des ungedämpften Systems. Dies führt auf eine Eigenwertaufgabe. Für deren Lösung ergeben sich Vereinfachungen, wenn die Massenmatrix eine Diagonalmatrix ist. Die diagonale Massenmatrix  $\mathbf{M}_t$  wurde bereits in Abschnitt 3.1.3.3 aufgebaut. Sie gilt in TK.

Aus Kompatibilitätsgründen muss die Steifigkeitsmatrix ebenfalls in das Trägheitshauptachsensystem transformiert werden. Dies geschieht wie folgt:

$$\mathbf{C}_t = \mathbf{T}_{st}^T \mathbf{T}_{gs}^T \mathbf{C}_g \mathbf{T}_{gs} \mathbf{T}_{st}, \text{ mit } \mathbf{T}_{st} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{st1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st2} & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.39)$$

$\mathbf{C}_g$  ist die für die dynamische Rechnung aufgestellte Steifigkeitsmatrix gemäß Abschnitt 3.1.4.6, während sich die Matrizen  $\mathbf{P}_{sti}$  aus Gleichung (3.25) und  $\mathbf{T}_{gs}$  nach (3.17) ergeben.

Die Eigenfrequenzen und Schwingformen sind die Lösungen der Eigenwertaufgabe (3.40):

$$(\mathbf{C}_t - \lambda_i \mathbf{M}_t) \mathbf{V}_m = \mathbf{0}. \quad (3.40)$$

Die  $\lambda_i$  sind gleich dem Quadrat der Eigenfrequenzen des ungedämpften Systems:  $\lambda_i = \omega_i^2$ , die Spalten der Matrix  $\mathbf{V}_m$  enthalten die Eigenvektoren bzw. Schwingformen.

### 3.1.7 Transformation auf Hauptkoordinaten

Die in Abschnitt 3.1.6 gemäß Gleichung (3.40) berechnete Matrix  $\mathbf{V}_m$  (auch Modalmatrix genannt) ist gleich der Transformationsmatrix  $\mathbf{T}_{th}$ , die vom Trägheitshauptachsensystem auf Hauptkoordinaten transformiert wird:

$$\mathbf{T}_{th} = \mathbf{V}_m. \quad (3.41)$$

Mit (3.41) ergeben sich folgende Beziehungen für die Transformation der Massen- und Steifigkeitsmatrix sowie des Kraftvektors auf HK:

$$\mathbf{M}_h = \mathbf{T}_{th}^t \mathbf{M}_t \mathbf{T}_{th}, \quad (3.42)$$

$$\mathbf{C}_h = \mathbf{T}_{th}^t \mathbf{C}_t \mathbf{T}_{th} \quad \text{und} \quad (3.43)$$

$$\mathbf{F}_h = \mathbf{T}_{th}^T \mathbf{T}_{st}^T \mathbf{T}_{gs}^T \mathbf{F}_g, \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{F}_h = \mathbf{T}_{th}^T \mathbf{T}_{st}^T \mathbf{T}_{gs}^T \mathbf{T}_{egi}^T \mathbf{F}_{ei}. \quad (3.44)$$

Beim Schwinger mit einem Starrkörper wurde die Stützerregung gleich in Schwerpunktkoordinaten definiert. Dies ist bei mehreren Starrkörpern schlecht möglich. Außerdem muss die Stützerregung jetzt nicht mehr in globaler z-Richtung wirken, sondern kann beliebig gedreht sein. Deshalb wird die Stützerregung zunächst auch in Elementkoordinaten beschrieben (3.46), wobei der Angriffspunkt im Ursprung des globalen Koordinatensystems liegt.

Eine gedrehte Lage (Stützerregung wirkt nicht in z) wird berücksichtigt durch die Transformationsmatrix  $\mathbf{T}_{ge}$  mit

$$\mathbf{s}_g = \mathbf{T}_{ge} \cdot \mathbf{s}_e \quad \text{und} \quad (3.45)$$

$$\mathbf{s}_e = [0 \quad 0 \quad s \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T. \quad (3.46)$$

Der Vektor  $\mathbf{s}_e$  hat die Dimension 6. Die Stützererregung  $\mathbf{s}$  wirkt standardmäßig (also ungedreht) in z-Richtung. Der Vektor  $\mathbf{s}_g$  hat die Dimension 13, womit  $\mathbf{T}_{ge}$  die Dimension 13x6 hat und gemäß (3.47) gebildet wird:

$$\mathbf{T}_{ge} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{eg}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{eg}^T \\ \mathbf{P}_{eg}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{eg}^T \\ [\mathbf{P}_{eg}^T]_{3,\bullet} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (3.47)$$

Die Dimensionen der Untermatrizen in (3.47) können (3.48) entnommen werden:

$$\mathbf{T}_{ge} [13 \times 6] = \begin{bmatrix} [3 \times 3] & [3 \times 3] \\ [3 \times 3] & [3 \times 3] \\ [3 \times 3] & [3 \times 3] \\ [3 \times 3] & [3 \times 3] \\ [1 \times 3] & [1 \times 3] \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

Da der Angriffspunkt der Stützererregung im Ursprung des globalen Koordinatensystems liegt, braucht eine Verschiebung in  $\mathbf{T}_{ge}$  nicht berücksichtigt zu werden. Neben der Berücksichtigung der Drehung in  $\mathbf{T}_{ge}$  erfolgt gleichzeitig eine Zuordnung der Stützererregung zu allen Koordinaten, an denen sie zu berücksichtigen ist (für die ungedrehte Lage sind das die Koordinaten z-Maschine, z-Fundament und elastische Umgebung).

Ist  $\mathbf{s}_g$  nach (3.45) berechnet, lässt sich die Stützererregung auf Hauptkoordinaten transformieren:

$$\mathbf{s}_h = \mathbf{T}_{th}^{-1} \mathbf{T}_{st}^{-1} \mathbf{T}_{gs}^{-1} \mathbf{s}_g. \quad (3.49)$$

### 3.1.8 Berücksichtigung der Dämpfung

Falls überhaupt Dämpfungswerte vorliegen, werden diese lokal für die Aufstellelemente angegeben. Die Hersteller von Schwingungsisolatoren geben für Dämpferelemente meist den Verlustwinkel  $\delta$  an. Der Verlust- oder Phasenwinkel sagt aus, um wie viel Grad die aus elastischem und dämpfendem Anteil zusammengesetzte Kraft der Verformung im Element vorseilt.

Im Programm wird das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $D$  eingegeben. Mit ihm werden oft Material- und Verbindungsstellendämpfungen beschrieben. Es bezieht sich ebenfalls auf die lokale Wirkung in den Aufstellelementen. In den Bewegungsgleichungen berücksichtigt die Dämpfungskonstante  $b$  den Einfluss der Dämpfung. Die verschiedenen Dämpfungsangaben lassen sich ineinander umrechnen, wobei die unter (3.50) zusammengefassten Beziehungen streng genommen nur für den Einmassenschwinger gelten.

$$D = \frac{1}{2} \tan \delta, \tag{3.50}$$

$$b = 2D\sqrt{c \cdot m}$$

Die Aufgabe besteht darin, Aussagen darüber zu machen, wie diese lokalen oder örtlichen Dämpfungen in den Feder-Dämpfer-Elementen auf die Dämpfung des Systems wirken.

Die Eigenwertlösungen des ungedämpften Systems liegen vor (vgl. Abschnitt 3.1.6). Damit lässt sich das System auf Hauptkoordinaten transformieren (Abschnitt 3.1.7), wodurch das Gleichungssystem entkoppelt wird und man das System durch 13 Einzelgleichungen (Einzelschwinger) beschreiben kann. Das soll hier genutzt werden. Nach [11] ist die Transformation mit den Eigenwertlösungen des ungedämpften Systems auch für schwach gedämpfte Systeme zulässig. Im allgemeinen Maschinenbau und auch bei Fundamentierungen ohne spezielle Dämpferelemente wirken nur Material- und Verbindungsstellendämpfungen. Dann ist die Forderung nach kleiner Dämpfung im Allgemeinen erfüllt durch:

- kleine globale Dämpfungswerte (Dämpfungsmaß  $D_{hj} \ll 1$ , im Maschinenbau  $0.0005 < D_{hj} < 0.15$ ) sowie
- geringe lokale Relativedämpfung an hoch beanspruchten Stellen und damit keine ausgeprägten örtlichen Kopplungen über Dämpfungskräfte.

Nach [11] kann man die lokalen Dämpfungsangaben  $\mathbf{D}_e$  über eine Energiebetrachtung auf das Hauptkoordinatensystem übertragen. In [12] wird ähnlich bei der Berechnung lokaler Dämpfungskonstanten ( $b_e$ ) verfahren. Die in **ISOMAG** verwendeten Algorithmen sind im Anhang in **Abb. 7.3** dargestellt.

Damit sind die bei der weiteren Rechnung benötigten Dämpfungswerte für das System in Hauptkoordinaten ( $D_{hj}$ ) sowie die für die Kraftberechnung erforderlichen Dämpfungsmatrizen der Aufstellelemente  $\mathbf{B}_{ei}$  gefunden.

Die modale Dämpfungsmatrix des Systems ergibt sich zu

$$diag(\mathbf{B}_h)_j = 2 \cdot diag(\mathbf{M}_h)_j \cdot D_{hj} \cdot \omega_j$$

### 3.1.9 Frequenzgänge

Die Berechnung der Frequenzgänge erfolgt in Hauptkoordinaten (HK). In HK ist das System entkoppelt und lässt sich wie 13 Einmassenschwinger behandeln (vgl. Abschnitt 3.1.7). Für den Einmassenschwinger lassen sich die Formeln leicht anschreiben (vgl. Abschnitte 2.1.1 und 2.1.2).

In den nächsten Abschnitten werden die Berechnungen für Kraft-, Stützen- und Unwucherregung getrennt dargestellt. Treten mehrere Erregungen gleichzeitig auf, werden die Ergebnisse der jeweiligen Rechnungen phasengerecht überlagert, d. h. komplex summiert.

### 3.1.9.1 Krafterregung

Auf das Schwingungssystem wirken harmonische Krafterregungen mit der Kreisfrequenz  $\Omega$ , dem Phasenwinkel  $\varphi_0$  und der Kraftamplitude  $\hat{F}$ . Bei der Lösung müssen sowohl die Amplituden als auch die Phasenlagen berücksichtigt werden. Deshalb ist der Übergang auf komplexe Größen sinnvoll. Analog Gleichung (2.3) schreibt man also für die veränderliche Kraft  $F$

$$F = \hat{F} \cdot e^{j(\Omega t + \varphi_0)} = \hat{F} \cdot e^{j\varphi_0} \cdot e^{j(\Omega t)} = \tilde{F} \cdot e^{j\Omega t}, \quad (3.51)$$

$$\tilde{F} = \hat{F}(\cos(\varphi_0) + j \sin(\varphi_0)) = \operatorname{Re}(\tilde{F}) + j \operatorname{Im}(\tilde{F}) \quad \text{mit}$$

$$\operatorname{Re}(\tilde{F}) = \hat{F} \cos(\varphi_0) \quad \text{und} \quad \operatorname{Im}(\tilde{F}) = \hat{F} \sin(\varphi_0). \quad (3.52)$$

Die reelle Kraftamplitude  $\hat{F}$  und der Phasenwinkel  $\varphi_0$  werden in **ISOMAG** am Element eingegeben. Wurden statt Betrag und Phase die Koeffizienten  $A_i$  und  $B_i$  eingegeben, liefert ein Koeffizientenvergleich, dass  $A_i$  gleich dem Realteil und  $B_i$  gleich dem Imaginärteil der komplexen Kraft sind. Die Umrechnung erfolgt dann gemäß Gleichung (3.52).

Um komplexe Kräfte abbilden zu können, wird ein Kraftvektor mit zwei Spalten bzw. eine Matrix der Dimension  $6 \times 2$  benötigt:

$$\tilde{\mathbf{F}} = [\operatorname{Re}(\mathbf{F}), \operatorname{Im}(\mathbf{F})]. \quad (3.53)$$

Im Programm werden zunächst an den Objekten "Krafteinleitung" sowie "Momenteinleitung" die harmonischen Erregungen zusammengefasst. Es werden Real- und Imaginärteil gebildet und getrennt aufsummiert. Für die standardmäßig in z-Richtung wirkende Kraft ergibt sich beispielsweise für j Harmonische am Element:

$$\tilde{F}_{ez} = -\sum \tilde{F}_j. \quad (3.54)$$

Für das um y wirkende Moment: ergibt sich

$$\tilde{M}_{ey} = \sum \tilde{M}_j. \quad (3.55)$$

Für die Erregungsvektoren am Element: erhält man schließlich

$$\tilde{\mathbf{F}}_e = [\tilde{0}, \tilde{0}, \tilde{F}_{ez}, \tilde{0}, \tilde{0}, \tilde{0},] \quad \text{bzw.} \quad \tilde{\mathbf{F}}_e = [\tilde{0}, \tilde{0}, \tilde{0}, \tilde{0}, \tilde{M}_{ey}, \tilde{0},]. \quad (3.56)$$

Diese Erregungen werden analog Gleichung (3.44) auf das Hauptkoordinatensystem transformiert und dort mit den harmonischen Kraft- bzw. Momentenerregungen anderer Objekte additiv überlagert (Schleife i über diese Objekte):



$$\tilde{\mathbf{F}}_h = \mathbf{T}_{th}^T \mathbf{T}_{st}^T \mathbf{T}_{gs}^T \mathbf{T}_{egi}^T \tilde{\mathbf{F}}_{ei}, \quad (3.57)$$

wobei die Transformationsmatrizen  $\mathbf{T}$  reell sind.

Gemäß der in Abschnitt **2.1.1** dargelegten Zusammenhänge bekommt man für jede Komponente  $k$  des Kraftvektors eine Komponente  $k$  des Verschiebungsvektors  $\tilde{\mathbf{x}}_h$  nach folgender Formel:

$$\tilde{x}_{hk} = \frac{\tilde{F}_{hk}}{C_{hkk}} \left[ \frac{1 - \eta_k^2}{(1 - \eta_k^2)^2 + 4D_k^2 \eta_k^2} - j \frac{2D_k \eta_k}{(1 - \eta_k^2)^2 + 4D_k^2 \eta_k^2} \right] \quad \text{mit} \quad (3.58)$$

$$\eta_k = \frac{\Omega}{\omega_k}.$$

Die Verschiebung  $\tilde{x}_{hk}$  ist eine Funktion der Erregerfrequenz  $\Omega$ . Um deren Verlauf zu bekommen, muss die Formel also für mehrere  $\Omega$  im interessierenden Frequenzbereich berechnet werden. Dieser und die Frequenzauflösung kann in ISOMAG vom Anwender festgelegt werden. Man erhält damit 2048 Wertepaare.  $\Omega$  ergibt sich nach **(3.59)**.

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{err} \quad (3.59)$$

Die Verschiebungen in Hauptkoordinaten lassen sich nun auf beliebige Punkte (auch auf den Schwerpunkt oder einen Federmittelpunkt) zurücktransformieren:

$$\tilde{\mathbf{x}}_e = \mathbf{T}_{eg} \mathbf{T}_{gs} \mathbf{T}_{st} \mathbf{T}_{th} \tilde{\mathbf{x}}_h. \quad (3.60)$$

Die komplexen Geschwindigkeiten ergeben sich gemäß **(2.5)** zu

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = j\Omega \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.61)$$

und die Beschleunigungen analog **(2.6)** zu

$$\ddot{\tilde{\mathbf{x}}} = -\Omega^2 \tilde{\mathbf{x}}. \quad (3.62)$$

Die Gleichungen **(3.61)** und **(3.62)** gelten in einem beliebigen Koordinatensystem (z. B. in Hauptkoordinaten oder in Elementkoordinaten).

Die Kraft im Aufstellelement ergibt sich analog **(2.11)** zu

$$\tilde{\mathbf{F}}_e = \mathbf{C}_e \cdot \tilde{\mathbf{x}}_e + \mathbf{B}_e \cdot \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_e. \quad (3.63)$$

Bildet man für eine komplexe Komponente des Vektors  $\tilde{\mathbf{F}}_e$  den Betrag, erhält man den Amplitudengang für die dazugehörige Koordinatenrichtung im Element. Der Amplitudengang lässt sich über der Frequenz grafisch darstellen.

### 3.1.9.2 Stützererregung

Bei der Stützererregung wird analog Abschnitt **3.1.9.1** vorgegangen. Detaillierte Ableitungen der Formeln findet man in Abschnitt **2.1.2**. Für die Stützererregung wird die komplexe Größe  $\tilde{s}_e$  eingeführt.

Auch hier werden zunächst die harmonischen Erregungen zusammengefasst. Für die z-Komponente des Erregungsvektors  $\tilde{s}_e$  werden je Harmonische j Real- und Imaginärteil gebildet und getrennt summiert:

$$\tilde{s}_{ez} = \sum \tilde{s}_j. \quad (3.64)$$

Da es nur eine Stützererregung gibt, entfällt hier die Summation über mehrere Elemente. Mit der Transformation auf Hauptkoordinaten gemäß **(3.45)** bzw. **(3.49)** erhält man:

$$\tilde{s}_g = \mathbf{T}_{ge} \cdot \tilde{s}_e \quad \text{und} \quad (3.65)$$

$$\tilde{s}_h = \mathbf{T}_{ih}^{-1} \mathbf{T}_{st}^{-1} \mathbf{T}_{gs}^{-1} \tilde{s}_g. \quad (3.66)$$

Für jede Komponente k des Erregervektors bekommt man eine Komponente k des Verschiebungsvektors analog **(2.16)** nach folgender Formel:

$$\tilde{x}_{hk} = \tilde{s}_{hk} \left[ \frac{1 - \eta_k^2 + 4D_k^2 \eta_k^2}{(1 - \eta_k^2)^2 + 4D_k^2 \eta_k^2} - j \frac{2D_k \eta_k^3}{(1 - \eta_k^2)^2 + 4D_k^2 \eta_k^2} \right]. \quad (3.67)$$

Für die Berechnung der Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Kräfte gelten die gleichen Beziehungen wie bei der Krafterregung (**(3.61)** bis **(3.62)**).

Treten Kraft- und Stützererregung gleichzeitig auf, werden die Ergebnisse beider Rechnungen phasengerecht überlagert, d. h. komplex summiert.

### 3.1.9.3 Unwuchterregung

Eine Unwucht wird wie zwei um 90 ° versetzte harmonische Krafterregungen gemäß Gliederungspunkt **3.1.9.1** behandelt. Fällt die Drehachse der Unwucht standardmäßig mit der y-Achse zusammen (Voreinstellung), sind die Beträge der Erregung in z- und x-Richtung gleich dem Produkt aus der Masse m und dem Abstand zwischen Drehachse und Schwerpunkt r (das Produkt aus m und r wird oft auch zusammengefasst und als Unwucht U bezeichnet):

$$\begin{aligned} \hat{F}_{z,x} &= m \cdot r \\ &= U \end{aligned} \quad (3.68)$$

$\varphi_{0z}$  ist dabei gleich dem eingegebenen Phasenwinkel  $\varphi_0$ , während  $\varphi_{0x}$  gleich  $\varphi_0 + 90^\circ$  bei Rechtslauf und  $\varphi_0 - 90^\circ$  bei Linkslauf beträgt.

Der Frequenzgang für die Unwuchterregung ergibt sich aus dem in Abschnitt **3.1.9.1** mit **(3.68)** berechneten Frequenzgang für die Unwucht  $U$ , multipliziert mit dem Quadrat der Drehgeschwindigkeit  $\Omega$ .

$$\text{FreqgUnwuchterregung} = \text{FreqgUnwucht} \cdot \Omega^2 \quad (3.69)$$

### 3.1.10 Vergrößerungsfunktion

Die Vergrößerungsfunktion  $V$  ist der auf 1 normierte Amplitudengang für Kraft und Weg gemäß **3.1.9**. Das bedeutet, der Betrag der Frequenzgänge wird durch den jeweils ersten Wert (d. h.  $y(\Omega=0)$ ) geteilt. Bei Unwuchterregung wird auf den ersten Wert des Amplitudenganges der Unwucht (statischer Wert, nicht mit  $\Omega^2$  multipliziert) mal  $\Omega^2$  normiert. Im allgemeinen Fall, in dem mehrere Erregungen definiert sind, können Frequenzgänge für Krafterregung ( $\text{FreqgKraft}$ ), Stützerregung ( $\text{FreqgStütze}$ ) und Unwucht ( $\text{FreqgUnwucht}$ ) existieren. Die Vergrößerungsfunktion  $V$  wird deshalb wie folgt berechnet:

$$V(\Omega) = \frac{|\text{FreqgKraft}(\Omega) + \text{FreqgStütze}(\Omega) + \text{FreqgUnwucht}(\Omega) \cdot \Omega^2|}{|\text{FreqgKraft}(0) + \text{FreqgStütze}(0) + \text{FreqgUnwucht}(0) \cdot \Omega^2|}. \quad (3.70)$$

Darin ist die Vergrößerungsfunktion des Schwingers mit einem Freiheitsgrad (und einer Erregung) gemäß Abschnitt **2.1.3** sowie die Vergrößerungsfunktionen für einzelne Erregungen als Sonderfall enthalten.

### 3.1.11 Zeitlösungen

#### 3.1.11.1 Zeitlösungen für nichtharmonische Erregung

Zeitlösungen lassen sich über so genannte Faltungen berechnen. Eine zeitabhängige Verformung  $x(t)$  infolge eines Kraftsignals  $F(t)$  ergibt sich beispielsweise aus

$$x(t) = g(t) * F(t), \quad (3.71)$$

wobei der Stern das Faltungszeichen und  $g(t)$  die Gewichtsfunktion sind.

Einer Faltung im Zeitbereich entspricht eine Multiplikation im Frequenzbereich. Transformiert man also diese Beziehung per Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich (Operator  $F\{ \}$ ), erhält man folgenden Zusammenhang:

$$F\{x(t)\} = F\{g(t)\} \cdot F\{F(t)\} = X(j\Omega) = G(j\Omega) \cdot F(j\Omega). \quad (3.72)$$

$G(j\Omega)$  ist dabei die so genannte Übertragungsfunktion. Man erhält sie beispielsweise, wenn man den Frequenzgang für eine Erregung mit der Amplitude 1 gemäß Abschnitt **3.1.9** berechnet. Die Erregung mit der Amplitude 1 wirkt dabei am gleichen Ort und in die gleiche Richtung wie die Erregung, für die die Zeitlösung gesucht wird. Den Frequenzgang berechnet man für den Ort bzw. die Koordinate, für den/die auch die Zeitlösung zu berechnen ist. Da die Übertragungsfunktionen also mit den im Pro-

gramm ohnehin vorhandenen Algorithmen für die Frequenzgänge berechnet werden können, bietet sich folgendes Vorgehen an: Man transformiert das Erregersignal in den Frequenzbereich und multipliziert es mit der Übertragungsfunktion. Die Lösung im Zeitbereich erhält man, indem man das Ergebnis per inverser FFT in den Zeitbereich zurücktransformiert.

Also werden je Erregerelement  $i$  die komplexen Übertragungsfunktionen  $\tilde{G}_{ij}$  nach Gleichung (3.73) für die Erregeramplitude 1 entsprechend der Frequenzlösung berechnet. Dabei ist  $j$  der Index der Koordinate, für die die Antwort bzw. Zeitlösung gesucht wird. Außerdem wird die Erregung im Zeitbereich entsprechend den Vorgaben punktweise aufgebaut. Dies geschieht in einem Bereich von 0 bis 20.475 s mit einer Schrittweite von 0.005 s, was genau 4096 Werten entspricht. Die Erregung wird per FFT in den Frequenzbereich transformiert (Gleichung (3.74)). Die Multiplikation beider Funktionen liefert die Lösung im Komplexen (vgl. Gleichung (3.75)).

$$\tilde{G}_{ij} = \tilde{x}_j(\hat{F}_i = 1) \quad (3.73)$$

$$\tilde{F}_i(j\Omega) = F\{F_i(t)\} \quad (3.74)$$

$$\tilde{x}_j = \tilde{G}_{ij} \cdot \tilde{F}_i \quad (3.75)$$

Für die Stützerregung sowie zur Berechnung der Kräfte bildet man entsprechende Übertragungsfunktionen und geht analog vor. Treten mehrere Erregungen auf, sind die Rechnungen (3.73) bis (3.75) für jede Erregung durchzuführen. Die Gesamtlösung  $\tilde{x}_j$  ergibt sich aus der Summe der Einzellösungen. Damit die Überlagerung phasengerecht erfolgen kann, muss die Summierung im Komplexen erfolgen.

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ergeben sich wieder zu:

$$\dot{\tilde{x}} = j\Omega\tilde{x}, \quad \text{bzw.} \quad (3.76)$$

$$\ddot{\tilde{x}} = -\Omega^2\tilde{x}. \quad (3.77)$$

Die gesuchte Zeitlösung ist gleich dem Realteil der inversen FFT (der Imaginärteil ist Null). Der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit wäre dann beispielsweise

$$v(t) = \text{Re}\left(F^{-1}\{\dot{\tilde{x}}\}\right). \quad (3.78)$$

### 3.1.11.2 Zeitlösungen für harmonische Erregung

Prinzipiell kann man alle Zeitlösungen wie zuvor beschrieben ermitteln. Damit können die Erregerfunktionen völlig beliebig, also auch harmonisch sein. Allerdings wird dabei auch immer das Einschwingverhalten mit berechnet (Startwerte:  $v=0$  und  $x=0$ , was nicht dem eingeschwungenen Zustand entspricht. Ist keine Dämpfung vorhanden, klingen die Anfangsstörungen nicht ab, und der eingeschwungene Zustand wird nie erreicht).

Die Berechnung wird für jede gegebene harmonische Erregerfrequenz  $\Omega_k$  durchgeführt (für eine bei harmonischer Erregung gegebene Konstante ist  $\Omega_k = 0$ ).

Die Übertragungsfunktion wird entsprechend **(3.73)** für  $\Omega = \Omega_k$  gebildet:

$$\tilde{G}_{ij} = \tilde{x}_j(\hat{F}_i = 1, \Omega = \Omega_k), \quad (3.79)$$

d. h., für die gegebene Erregerfrequenz  $\Omega_k$  erhält man eine komplexe Lösung (die Übertragungsfunktion hat nur einen komplexen Wert).

Die betrachtete harmonische Erregung  $k$  wird in das Komplexe übertragen (dies ermöglicht die phasenrichtige Berücksichtigung der Erregung und die Multiplikation nach **(3.81)**). Hier kann man auf die Fourier-Transformation verzichten. Ein Koeffizientenvergleich liefert:

$$\operatorname{Re}(\tilde{F}_k) = A_k, \quad \operatorname{Im}(\tilde{F}_k) = B_k. \quad (3.80)$$

$A_k$  und  $B_k$  sind die im Programm für die Erregung eingegebenen Koeffizienten für Kosinus- bzw. Sinusanteil. Wurden stattdessen Betrag und Phasenlage eingegeben, erfolgt die Berechnung gemäß **(3.52)**.

Die komplexe Verschiebung bei Krafterregung ergibt sich analog zu Gleichung **(3.75)** zu:

$$\tilde{x}_{jk} = \tilde{G}_{ij} \cdot \tilde{F}_{ik}. \quad (3.81)$$

Die Rückrechnung in den Zeitbereich kann wieder per Koeffizientenvergleich erfolgen:

$$A_{jk} = \operatorname{Re}(\tilde{x}_{jk}), \quad B_{jk} = \operatorname{Im}(\tilde{x}_{jk}). \quad (3.82)$$

Die Zeitlösung ergibt sich schließlich durch Aufsummierung der einzelnen Harmonischen  $k$  und Darstellung über der Zeit  $t$ :

$$x_j(t) = \sum_k A_{jk} \cos(\Omega_k t) + B_{jk} \sin(\Omega_k t), \quad \text{mit } t = 0 \dots t_{END}. \quad (3.83)$$

Sind mehrere Erregungen vorhanden, wird außerdem über alle Erregungen summiert.

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen werden wieder gemäß **(3.76)** bzw. **(3.77)** im Komplexen berechnet. Im Zeitbereich gilt dann:

$$v_j(t) = \sum_k A_{jk} \cos(\Omega_k t) + B_{jk} \sin(\Omega_k t), \quad \text{mit } A_{jk} = \operatorname{Re}(\dot{\tilde{x}}_{jk}), \quad \text{und } B_{jk} = \operatorname{Im}(\dot{\tilde{x}}_{jk}) \quad \text{bzw.} \quad (3.84)$$

$$a_j(t) = \sum_k A_{jk} \cos(\Omega_k t) + B_{jk} \sin(\Omega_k t), \text{ mit } A_{jk} = \operatorname{Re}(\ddot{x}_{jk}), \text{ und } B_{jk} = \operatorname{Im}(\ddot{x}_{jk}). \quad (3.85)$$

Bei Stützererregung wird mit der Übertragungsfunktion für Stützererregung gearbeitet und analog verfahren.

### 3.1.11.3 Unwucht

Eine Unwucht wird wie zwei um  $90^\circ$  versetzte harmonische Erregungen gemäß Gliederungspunkt **3.1.11.2** behandelt. Fällt die Drehachse der Unwucht standardmäßig mit der y-Achse zusammen (Voreinstellung), sind die Beträge der Erregung in z- und x-Richtung gleich dem Produkt aus der Masse  $m$ , dem Abstand zwischen Drehachse und Schwerpunkt  $r$  sowie dem Quadrat der Drehgeschwindigkeit  $\Omega$  (das Produkt aus  $m$  und  $r$  wird oft zusammengefasst und als Unwucht bezeichnet):

$$\hat{F}_{z,x} = m \cdot r \cdot \Omega^2. \quad (3.86)$$

$\varphi_{0z}$  ist dabei gleich dem eingegebenen Phasenwinkel  $\varphi_0$ , während  $\varphi_{0x}$  gleich  $\varphi_0 + 90$  beträgt.

Bei Rechtslauf laufen beide Kräfte mit  $+\Omega$  um, während bei Linkslauf die Erregerkreisfrequenz  $-\Omega$  beträgt.

### 3.1.12 **Auslegungsrechnung**

Neben der dynamischen Analyse des modellierten Systems (Nachrechnung) unterstützt **ISOMAG** den Anwender auch bei der Suche nach geeigneten Isolatoren. Erforderliche Steifigkeiten und zu ertragende Belastungen werden ermittelt. Mit diesen Größen lässt sich nach geeigneten Isolatoren in der Datenbank suchen (Abschnitt **3.2**).

Die Auslegungsrechnung dient der Vorauswahl von Aufstellelementen und erfolgt immer für Minimalmodelle mit nur einer Koordinatenrichtung (in der Regel z). Inwieweit sich die hierfür getroffenen Annahmen auf das System übertragen lassen, zeigt die Nachrechnung. Unter Umständen müssen Steifigkeiten und Trägheiten noch variiert werden, um den gewünschten Isolationsgrad auch im System mit bis zu 13 Freiheitsgraden und Eigenfrequenzen sowie Schwingformen zu erreichen.

#### 3.1.12.1 Berechnung der erforderlichen Steife für die einfache Schwingungsisolierung

Die Berechnung der erforderlichen Steife für die einfache Schwingungsisolierung soll weitestgehend dem entsprechen, was die Hersteller in ihren Katalogen zur Elementauswahl empfehlen.

Bei der einfachen Schwingungsisolierung wird die erforderliche Steife für den Schwinger mit einem Freiheitsgrad berechnet. Häufig erfolgt die Fundamentierung so, dass sie symmetrisch ist. Damit entkoppeln sich Bewegungsgleichungen und man kann die Gleichung für den Einmassenschwinger auf verschiedene Freiheitsgrade anwenden und somit die Aufstellelemente für verschiedene Schwingformen

separat auslegen. Bei Symmetrie zur x-z- und y-z-Ebene erhält man beispielsweise entkoppelte Gleichungen für die Translation in z und für die Rotation um z (vgl. [19]). Gelingt es, Massen- und Federschwerpunkt (gemäß 3.1.4.5 und 3.1.4.4) auch in z-Richtung zusammenzubringen (z. B. bei tiefer Schwerpunktlage und hängendem Fundament), lassen sich alle Freiheitsgrade entkoppeln.

In der Praxis wird häufig nur die z-Richtung des Schwingers betrachtet. Das System wird danach dimensioniert, unabhängig davon, ob es entkoppelt ist oder nicht und ohne Beachtung der weiteren Frequenzen. Im Programm wird der Schwinger mit einem Freiheitsgrad nur zur Vorauswahl (Auslegung) von Aufstellelementen genutzt. Bei allen weiteren Rechnungen (Nachrechnung) wird der komplette, auch gekoppelte Schwinger mit seinen bis zu 13 Freiheitsgraden betrachtet.

Zur Berechnung der erforderlichen Steife werden als Eingangsgrößen benötigt:

- die minimale Erregerfrequenz  $f_{errmin}$ ,
- das gewünschte Abstimmungsverhältnis  $av$  oder der gewünschte Isolationsgrad  $i$ ,
- die Masse des auszulegenden Systems  $m_{ausl}$  sowie
- die Anzahl der für diese Schwingung relevanten Aufstellelemente  $n_{fdausl}$ , damit die erforderliche Steife pro Aufstellelement ermittelt werden kann (gleiche Steifigkeiten und Belastung vorausgesetzt).

Diese Größen können eingegeben werden. Wurde bereits mit der Modellbeschreibung begonnen, werden die dem System bekannten Werte der Maschine für den Schwinger mit einem Freiheitsgrad in z-Richtung als Voreinstellung eingetragen.

Folgende Formeln führen über die Eigenfrequenz des Schwingers mit einem Freiheitsgrad  $f_{eig1fg}$  auf die erforderliche Steife der Aufstellelemente  $c_{erfe}$ :

$$f_{eig1fg} = f_{errmin} / av \text{ bzw.}$$

$$f_{eig1fg} = f_{errmin} \sqrt{\frac{i-1}{i-2}} \quad (3.87)$$

$$c_{erfges} = m_{ausl} (2\pi f_{eig1fg})^2 \text{ und} \quad (3.88)$$

$$c_{erfe} = \frac{c_{erfges}}{n_{fdausl}}. \quad (3.89)$$

Die für die Auslegung relevante Kraft im Aufstellelement ergibt sich zu:

$$F_{eausl} = \frac{m_{ausl} \cdot g + F_{statz}}{n_{fdausl}}. \quad (3.90)$$

Mit  $F_{\text{stat } z}$  sind alle statischen und konstanten Kräfte bzw. Kraftkomponenten in  $z$ -Richtung berücksichtigt.

Die so ermittelten Werte für die erforderliche Steifigkeit und Belastung der Elemente entsprechen denen, die man auch nach den von den Herstellern vorgeschlagenen Berechnungsalgorithmen erhält. Bei der Kraftermittlung wird davon ausgegangen, dass alle Aufstellelemente gleichmäßig durch das Gewicht der Masse  $m_{\text{ausl}}$  belastet sind. Dies muss nicht der Fall sein. Außerdem können äußere statische Kräfte hinzukommen. Sind genauere Werte bekannt, können diese explizit eingegeben werden.

### 3.1.12.2 Steife und Fundamentmasse für die doppelte Schwingungsisolierung

Ausgelegt wird für den Zweimassenschwinger (**Abb. 2.3**) und tiefe Abstimmung. Es wird davon ausgegangen, dass  $m_1$  und  $c_1$  bereits feststehen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn man zuvor die Möglichkeiten der einfachen Schwingungsisolierung ausgereizt hat.

Die Fundamentmasse sollte nach **2.2.1** möglichst hoch sein. In der Praxis sind Werte vom Fünf- bis zum Zwanzigfachen der Maschinenmasse üblich. Ist noch kein Fundament vorhanden, schlägt das Programm ein Fundament mit angepasster Geometrie vor. Der Anwender kann die Fundamentmasse bei Bedarf ändern, z.B. durch Variation von Geometrie oder Dichte.

Nun bleibt als auszulegende Größe noch die Federsteifigkeit  $c_2$ , d. h. die der Isolatoren zwischen Fundament und Umgebung.

Mit

$$i = 1 - V \quad (3.91)$$

und **(2.28)**, **(2.26)** sowie **(2.21)** ergibt sich

$$c_2 = \frac{c_1 \cdot (1 - i) \cdot \left( \frac{m_2}{m_1} \cdot (\eta^2 - 1) - 1 \right)}{1 - i \cdot \left( 1 - \frac{1}{\eta^2} \right)}. \quad (3.92)$$

Praktisch sinnvolle Werte liefert **(3.92)** nur für  $\eta > 1$ . Außerdem ist zu beachten, dass  $\eta$  hier nicht wie beim Einmassenschwinger ein Maß für den Abstand der Frequenzen (Abstimmverhältnis) ist, sondern eher eine Rechengröße mit

$$\eta = \Omega \cdot \sqrt{\frac{m_1}{c_1}}. \quad (3.93)$$

Nach Abschnitt **2.3** ist der Begriff des Abstimmungsverhältnisses beim Zweimassenschwinger nicht eindeutig. Deshalb wird hier mit dem Isolationsgrad als Maß für die Schwingungsisolierung gearbeitet.



Im Programm wird für  $c_1$  ein Element der globalen Steifigkeitsmatrix eingesetzt:

$$c_1 = [C_g]_{3,3} \quad (3.94)$$

Mit (3.94) werden alle an der Maschine in z-Richtung wirkenden Steifigkeiten (Steifigkeitskomponenten) berücksichtigt.

Steifigkeiten, die nicht zwischen Maschine und Fundament wirken, verfälschen die Auslegung. Das Ergebnis ist aber auch nicht richtig, wenn diese Steifigkeiten aus  $c_1$  herausgerechnet werden. Es handelt sich hier nur um eine Auslegung. Endgültige Ergebnisse bringt die Nachrechnung. Bei Bedarf können während der Auslegungsrechnung Steifigkeiten zwischen Maschine und Umgebung durch den Anwender im Modell eliminiert werden. Steifigkeiten zwischen Maschine und Umgebung werden ohnehin selten modelliert.

## 3.2 Datenbankbindung

### 3.2.1 Ziel und Anforderungen

Die Datenbankbindung ermöglicht es dem Anwender, vom Programm aus gezielt nach geeigneten Isolatoren zu suchen und die für die Berechnung relevanten Daten zu übernehmen. Die elektronische Datenbank ersetzt das manuelle Blättern in gedruckten Katalogen sowie das Abschreiben der Eingangsgrößen für das Programm. Sie verwaltet Isolatoren verschiedener Anbieter, ist also nicht an einen bestimmten Hersteller gebunden.

Für die **ISOMAG**-Berechnungen gibt es einen unerlässlichen Satz von Basisdaten, die den Herstellerangaben entnommen werden können. Leider beschreiben die Anbieter ihre Produkte unterschiedlich, so dass gleichwertige Informationen unterschiedlich dargestellt werden. Um für die Datenbank eine einheitliche Darstellung zu finden, wurden die Kataloge verschiedener Hersteller ([19] bis [23]) analysiert. Es galt herauszufinden, welche Angaben am häufigsten gemacht werden und wie sich äquivalente Größen ineinander umrechnen lassen. Letztendlich wurde anhand der Normen [17] und [18] entschieden, welche Größen in der Datenbank abgelegt werden.

Neben den für die Berechnung wichtigen Angaben sollen weitere Größen in der Datenbank Berücksichtigung finden. Dazu zählen Hauptabmessungen und Anschlussmaße, um bei der Auswahl auch konstruktive Aspekte berücksichtigen zu können. Angaben zum Hersteller sowie die genaue Typbezeichnung ermöglichen schließlich eine Bestellung.

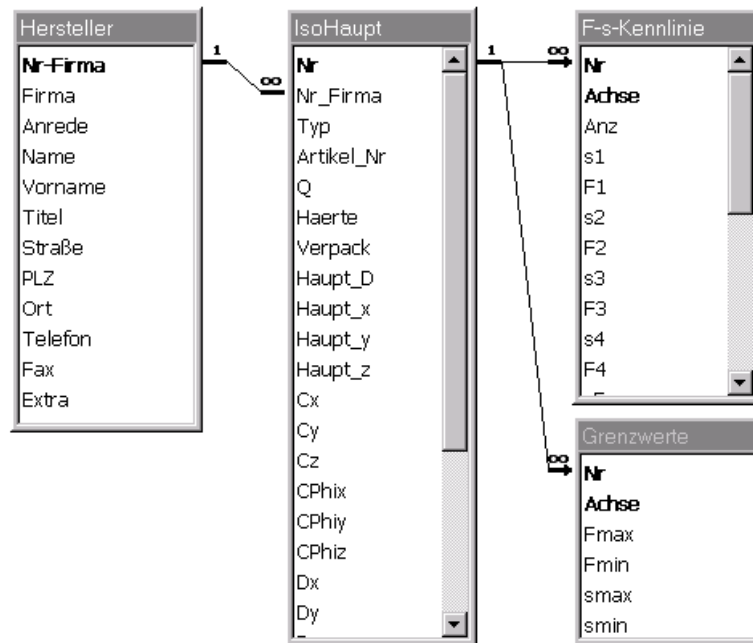
Als Datenbankformat wird Microsoft SQL Server Compact (SDF-Format) verwendet.

### 3.2.2 Datenbankstruktur

Die Daten werden geeignet gruppiert und in verschiedenen Tabellen verwaltet. Die Zuordnung der einzelnen Tabellen zueinander erfolgt über Verweisstrukturen.

So werden die Herstellerdaten separat in einer Tabelle "Hersteller" geführt. Alle Basisdaten und allgemein üblichen skalaren Parameter (Artikel-Nr., Hauptabmessungen, (mittlere) Steife etc.) werden in einer Tabelle "IsoHaupt" geführt. Diese Tabelle enthält eine Referenz auf den zugehörigen Datensatz von "Hersteller" (vgl. **Abb. 3.7**).

Maximal- und Minimalwerte für Federkraft und Federweg sind in einer Tabelle "Grenzwerte" enthalten. Jeder Eintrag enthält eine Referenz auf den zugehörigen Datensatz von "IsoHaupt".



**Abb. 3.7** Die Struktur der Datenbank der Schwingungsisolatoren

Da die Federkennlinien der meisten Isolatoren nichtlinear sind, besteht die Möglichkeit, in der Tabelle "F-s-Kennlinie" den Kraft-Weg-Zusammenhang als Punktfolge (mit bis zu zehn Punkten) abzulegen. Auch hier enthält jeder Eintrag eine Referenz auf den zugehörigen Datensatz von "IsoHaupt".

Zusätzlich zu den beschriebenen Tabellen „F-s-Kennlinie“, „Grenzwerte“, „Hersteller“ und „IsoHaupt“ existieren weitere Tabellen. Solche die in Großbuchstaben geschrieben sind enthalten interne Metadaten die von ISOMAG für die Darstellung der Daten verwendet werden. Bei den beiden Tabellen „Federn“ und „Federn\_mit\_Hersteller“ handelt es sich um temporäre Tabellen die von ISOMAG selber erstellt und befüllt werden. Sie enthalten Kombinationen aus Datensätzen anderer Tabellen um schneller darauf zugreifen zu können.

Die Angaben in den Tabellen "Grenzwerte" und "F-s-Kennlinie" sind optional. Für alle vom Hersteller angegebenen Achsenrichtungen (z. B. x, y und/oder z) wird ein eigener Datensatz eingerichtet. Der Eintrag im Feld „Achse“ gibt an, für welche Richtung die Werte gelten. Falls die Werte für x und y identisch sind (z. B. bei zylindrischen Isolatoren), kann einfach "xy" als Achse angegeben werden.

Alle Zahlenwerte eines Feldes werden in einer einheitlichen Maßeinheit angegeben. Sollte es Unterschiede bei verschiedenen Herstellerkatalogen geben, ist während der Datenerfassung (die nicht Bestandteil des Projektes ist) eine Umrechnung vorzunehmen.

Der Parameter "cAusl" der Tabelle "IsoHaupt" wird bei der statischen Auslegung (Assistenten für doppelte bzw. einfache Schwingungsisolierung) als Auswahlparameter benutzt. Der Parameter stellt die mittlere statische Steifigkeit des Isolators in z-Richtung dar.

## 4 Programmbeschreibung

### 4.1 Hard- und Software – Anforderungen

Das Programm **ISOMAG** ist eine 32 bit Applikation. Es läuft auf allen Windows Versionen ab XP.

Die grafische 3D-Darstellung erfordert sehr viel Rechenleistung. Deshalb empfiehlt sich für größere Modelle die Nutzung einer Grafikkarte mit 3D Hardware-Unterstützung.

### 4.2 Leistungsumfang und Einsatzgebiet

Hauptanwendungsgebiet des Programms ist die schwingungsisolierte Aufstellung von Maschinen und Geräten. Die Aufstellung erfolgt auf elastischen Elementen - den Isolatoren - und ist mit oder ohne Fundament möglich. Das Fundament kann starr oder elastisch mit dem aufzustellenden Objekt verbunden sein.

Das Programm **ISOMAG** berechnet das dynamische Verhalten eines oder zweier starrer Körper, die elastisch gegeneinander und elastisch gegen eine Umgebung abgestützt sind. Die Umgebung kann als unnachgiebig angenommen werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Dynamik des Aufstellortes in vertikaler Richtung über Ersatzparameter (Masse und Steifigkeit) zu berücksichtigen.

Jeder starre Körper hat sechs Freiheitsgrade im Raum. Er zeichnet sich dadurch aus, dass die Verformungen in seinem Inneren wesentlich kleiner sind als die Bewegungen, die er aufgrund der elastischen Abstützung gegenüber anderen Körpern oder seiner Umgebung ausführt. Als starre Körper gelten beispielsweise eine Maschine, ein Motorblock oder ein in sich starres Aggregat (inklusive Fundament, falls dies starr angebunden ist). Bei elastischer Ankopplung bildet ein starres Fundament (Blockfundament) den zweiten starren Körper.

Nimmt man außerdem die Umgebung in vertikaler Richtung als nachgiebig an, dann sind insgesamt 13 Freiheitsgrade ( $2 \times 6 + 1$ ) zu berücksichtigen.

Unter elastischer Abstützung versteht man die elastische Wirkung von Aufstellelementen, Isolatoren oder Zusatzfedern, z. B. Rohranschlüssen. Schwache Dämpfung - so die Materialdämpfung der elastischen Elemente - kann ebenfalls berücksichtigt werden. Die Parameter der Aufstellelemente lassen sich der angeschlossenen Datenbank entnehmen.

Bei den Berechnungen werden alle 13 Freiheitsgrade berücksichtigt. Damit erhält man nicht nur alle (bis zu 13) interessierenden Eigenfrequenzen und Schwingformen. Es sind auch keine Bedingungen bezüglich der Entkopplung einzelner Freiheitsgrade zu erfüllen. Schwinger mit einem oder zwei Freiheitsgraden und ebene Modelle sind als Sonderfälle enthalten.

Die Erregung kann durch konstante, harmonische und transiente Kräfte (Krafterregung) oder durch harmonische und transiente Bewegung der Umgebung (Stützererregung) erfolgen. Damit lassen sich sowohl Aufgaben der Schwingungsisolierung von Maschinen als auch von Geräten gemäß **Abb. 1.1** mit **ISOMAG** behandeln. Außerdem können Zeit- und Frequenzlösungen für Unwuchterregungen berechnet werden. Wirken mehrere Erregungen zugleich, liefert eine phasengerechte Überlagerung die tatsächlichen Beanspruchungen (und nicht die un reale Summe der Maximalwerte). Die Ausgabe der Summenkräfte auf den Boden gestattet eine schnelle Beurteilung der Wirksamkeit der Schwingungsisolierung.

Das Programm wird grafisch-interaktiv bedient. Sowohl das Modell als auch die Eingaben und Ergebnisse werden in geeigneter Weise numerisch und grafisch dargestellt.

Im Einzelnen führt das Programm folgende Berechnungen aus:

- Starre Körper werden aus beliebig vielen geometrisch elementaren Grundkörpern (Quader, Hohlzylinder, Dreikant, Kugel, allgemeine Masse sowie Drehträgheit) zusammengesetzt. Für ein oder zwei starre Körper (Maschine und Fundament) werden die Trägheitseigenschaften berechnet. Dazu zählen die Lage des Schwerpunktes, die Masse, die Hauptträgheitsmomente und die Richtungen der Hauptträgheitsachsen. Die Berechnung erfolgt für jeden Körper separat sowie für beide Körper gemeinsam. Die einzelnen Grundkörper können sich zueinander an beliebigen Positionen befinden und beliebig gedreht bzw. geneigt sein.
- Für beliebig viele Isolatoren - deren Steifigkeiten auch nichtlinear sein können - werden die Federungseigenschaften, d. h. die Größen und Richtungen der Hauptverschiebesteifigkeiten sowie die Lage des Federungsmittelpunktes (falls dieser existiert) ermittelt. Die Berechnung erfolgt für alle an der Maschine (Starrkörper 1) befindlichen Isolatoren und alle mit dem Fundament (Starrkörper 2) **und nicht mit der Maschine** verbundenen Isolatoren (Federungseigenschaften für zwei Gruppen von Isolatoren). Diese Ergebnisse ermöglichen es beispielsweise, die durch das Gewicht belastete Maschine und das Fundament mit Maschine waagrecht auszurichten. Die einzelnen Isolatoren können sich an beliebigen Positionen befinden und beliebig gedreht bzw. geneigt sein.
- Eine den Vorschriften der Hersteller entsprechende Auslegungsrechnung für die einfache Schwingungsisolierung, ein Assistent für die doppelte Schwingungsisolierung sowie die Datenbankbindung mit vielfältigen Suchfunktionen unterstützen den Anwender bei der Auswahl geeigneter Isolatoren.
- Es werden die statischen Verformungen in den Aufstellelementen und in beliebigen Punkten des Systems berechnet. Außerdem erhält man die statischen Belastungen der Aufstellelemente und die Summe der statischen Belastungen an Punkten (auf die Punkte umgerechnet bzw. transformiert). Die Einhaltung von Grenzwerten bezüglich Belastung und Verformung wird überwacht. Das System wird auf statische Bestimmtheit (Stabilität) geprüft.
- **ISOMAG** berechnet die Eigenfrequenzen und Schwingungsformen.
- Amplitudengänge und Vergrößerungsfunktionen für Kraft und Weg bei harmonischen Erregungen (Kraft- und Stützererregung) sowie Unwuchterregung werden berechnet und über der Frequenz dargestellt. Die zeitlichen Verläufe der Kräfte in den Aufstellelementen sowie Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung an be-

liebigen Punkten lassen sich für harmonische, transiente sowie Unwuchterregung ermitteln. Die vielfältigen Auswertungsmöglichkeiten in den Darstellungsfenstern gestatten unter anderem die Prüfung des erreichten Isolationsgrades und die Berechnung von Maximal-, Mittel- oder Effektivwerten. Die verschiedenen, auch mehrfachen Kraft- bzw. Moment- sowie Unwuchterregungen können sich an beliebigen Positionen befinden und beliebig im Raum orientiert sein. Die Stützerregung erfasst eine Bewegung der gesamten Umgebung/Aufstellfläche in beliebig vorgegebener Richtung. Die Materialdämpfung (schwache Dämpfung) kann berücksichtigt werden.

- Statische Verformungen, Eigen- und Betriebsschwingformen lassen sich über der Struktur grafisch darstellen (Animation).
- Die Summe der Kräfte auf den Boden - phasenrichtig oder betragsmäßig gebildet - steht als Ausgabegrößen zur Verfügung. Die Beträge/Amplituden der Bewegung von Punkten im Raum werden berechnet.

Folgende Annahmen liegen den Programm-Algorithmen zugrunde:

- kleine Schwingwegamplituden und Verformungen (klein gegenüber den geometrischen Abmessungen der Starrkörper),
- ideal starrer Körper,
- masselose Federn,
- lineare Feder-Charakteristik um den Arbeitspunkt (statische Gleichgewichtslage),
- Unnachgiebigkeit des Aufstellungsortes in horizontaler Richtung sowie
- kleine Dämpfung ( $D < 0.15$ ).

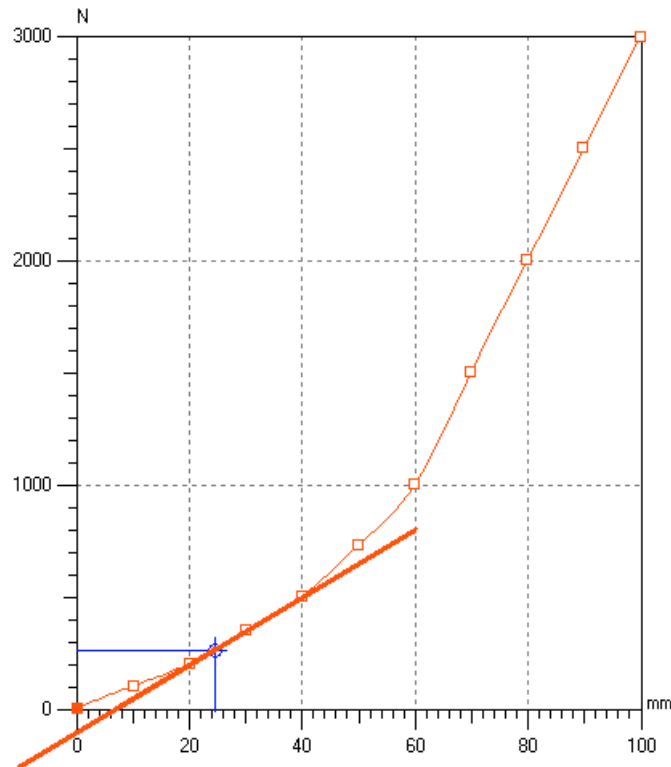
#### **4.2.1 Einschränkungen**

Die Ergebnisse der Berechnungen im Zeitbereich und Frequenzbereich stellen das Verhalten des im Arbeitspunkt linearisierten und eingeschwingenen Systems dar. Der Arbeitspunkt wird dabei durch die Einfederung des Systems resultierend aus dem Eigengewicht und den statischen Lasten definiert.

Dieses Verfahren ist für die Standardaufgaben bei der Schwingungsisolierung sehr gut geeignet. Es bestehen jedoch Einschränkungen, die in den nächsten Abschnitten beschrieben werden.

##### **4.2.1.1 Federn mit nichtlinearer Kraft-Weg Kennlinie**

Elastomerfedern haben zumeist eine progressive Federkennlinie. Diese kann punktweise im Parameterdialog der Isolatoren eingegeben werden. Bei der Berechnung der statischen Einfederung werden diese Nichtlinearitäten korrekt berücksichtigt. Ab der Eigenfrequenzanalyse werden die Steifigkeiten aus den Tangenten der Kennlinien im Arbeitspunkt gewonnen. Die Steifigkeiten sind also für alle Berechnungen im Frequenz- und Zeitbereich konstant und unabhängig von den Verformungen.



**Abb. 4.1** Kraft-Weg Kennlinie mit Tangente im Arbeitspunkt

Für kleine (bei der Schwingungsisolierung übliche) Verformungen kann dieser Fehler vernachlässigt werden. Bei großen Verformungen muss mit Abweichungen gerechnet werden.

Zur Modellierung folgender Effekte ist das Verfahren allerdings nicht geeignet:

- Modellierung von elastischen Anschlägen bzw. Pufferfedern (alle berücksichtigten Federn befinden sich ständig im Eingriff).
- Federn mit unterschiedlichem Verhalten bei Zug und Druck (z.B. Seile, Kontakte).

#### 4.2.1.2 Große Verdrehungen

Bei der Berechnung der Übertragungsfunktion des Systems wird von einem linearen System ausgegangen. Unser System ist aber nur für kleine Winkel annähernd linear, solange die Beziehungen:

$$\begin{aligned} \cos(\varphi) &\approx 1 \\ \sin(\varphi) &\approx 0 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ausgenutzt werden können. Bei Anlagen, die schwingungsisoliert aufgestellt werden sollen, betragen die Verdrehungen meist nur wenige Grad. Die Annahmen sollten also gewährleistet sein.

#### 4.2.1.3 Impulse und andere nichtperiodische Erregungen

Allen Zeitsignale, die der FFT unterzogen werden, wird Periodizität unterstellt (Länge des Signals ist gleich der Periodendauer). Dies gilt auch für Impulse und nutzerdefinierte Erregungen. Will man nur eine einmalige Impulsanregung betrachten, sollte also die Länge des Zeitsignals viel größer als die Impulsbreite sein. Durch die Dämpfung kann sich das System während der Impulspause ausschlagen und Mehrfachanregungen werden vermieden.

Bei nutzerdefinierten Erregungen sollten Sie also dem interessierenden Verlauf einen ausreichend langen Abschnitt ohne Erregung anfügen, in der das System ausschlagen kann.

Analoges gilt bei Stützererregung, wenn Sie eine Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung vorgeben, bei der die zugehörige Auslenkung (einmalige bzw. zweimalige Integration über der Zeit) zum Ende nicht Null ergibt. Dann befindet sich das System bereits im ausgelenkten Zustand, was zu einem Offset in den Ergebnisverläufen über der Zeit führt.



### 4.3 Allgemeiner Ablauf

Der allgemeine Programmablauf ist im Anhang in **Abb. 7.4** bis **Abb. 7.7** skizziert. Bei der schwingungs isolierten Aufstellung wird zweckmäßigerweise zunächst stets die einfache Schwingungs isolierung versucht. Können keine geeigneten Isolatoren (nach Anzahl, Anordnung und Parameter) gefunden werden und führt auch das Anbringen von Zusatzmassen (z. B. starr angekoppeltes Fundament) nicht zum Ziel, kann der Erfolg einer doppelten Schwingungs isolierung geprüft werden. Diese knüpft dabei an die Ergebnisse der einfachen Isolierung an, indem das einfach aufgestellte Objekt auf einem elastisch gelagerten Fundament platziert wird (theoretische Grundlagen vgl. Abschnitt 2.2).

Zunächst werden die Trägheitseigenschaften des zu isolierenden Objektes bzw. des ersten starren Körpers (Maschine) beschrieben. Der Gesamtkörper kann dabei aus mehreren Teilkörpern zusammengesetzt werden.

Anschließend gibt man Lage und Anzahl der Aufstellelemente an (für die einfache Isolierung). Bei Bedarf können die Isolatoren so ausgerichtet werden, dass ihr Schwerpunkt mit dem Massenschwerpunkt zusammenfällt. Um die Maschine unter Eigengewicht gerade aufzustellen, sollte eine Hauptsteifigkeit in z-Richtung und durch den Massenschwerpunkt der Maschine gehen. (Werden später die Aufstellelemente mit unterschiedlichen oder nichtlinearen Steifigkeiten parametrisiert, kann sich ein neuer Federungsmittelpunkt ergeben.)

Der Assistent für die einfache Schwingungs isolierung erleichtert die sinnvolle Vorauswahl geeigneter Isolatoren. Der Assistent ermittelt nach dem Modell des Schwingers mit einem Freiheitsgrad die erforderliche Steife und die Belastung der Isolatoren. Dazu sind der gewünschte Isolationsgrad und die minimale Erregerfrequenz einzugeben, falls die Erregungen noch nicht definiert wurden. Mit den Werten für Steifigkeit und Belastung sucht **ISOMAG** in der Datenbank nach geeigneten Aufstellelementen. Bei Bedarf kann die Auswahl mit geänderten oder zusätzlichen Suchkriterien präzisiert werden. War die Suche nicht erfolgreich, können die Masse oder die Anzahl sowie die Lage der Isolatoren variiert werden.

Die Werte der ausgewählten Isolatoren können vom Programm übernommen werden. Nachdem die äußeren (statischen) Lasten definiert sind, werden die statischen Verformungen und inneren Belastungen an den Isolatoren ermittelt. Für den damit gefundenen Arbeitspunkt (statische Gleichgewichtslage) wird die vollständige Steifigkeitsmatrix aufgestellt. Außerdem prüft das Programm die Einhaltung der statischen Grenzwerte sowie die statische Bestimmtheit des Systems.

Bei Bedarf kann wieder die Lage der Aufstellelemente variiert werden, um Massen- und Federschwerpunkt zur Deckung zu bringen oder um die statische Neigung des Fundamentes zu eliminieren.

Es werden die sechs Eigenfrequenzen und Schwingformen für das ungedämpfte System berechnet.

Die Berechnung der Amplitudengänge und der Zeitlösungen erfolgt unter Berücksichtigung der Dämpfung. Man kann sich für verschiedene Koordinatenrichtungen den

Amplitudengang sowie die Vergrößerungsfunktion darstellen lassen. Durch Eintrag des geforderten Isolationsgrades und der Erregerfrequenzen in die Darstellung der Vergrößerungsfunktion kann die Einhaltung bzw. das Erreichen des Isolationsgrades überprüft werden. Zur Beurteilung der Isolierwirkung kann auch die Summe der Kräfte auf den Boden (Umgebung) herangezogen werden.

Die aufgrund der definierten Erregungen auftretenden Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen an definierten Punkten sowie Kräfte in den Aufstellelementen lassen sich auch über der Zeit darstellen. Die für die Schwingungsbeurteilung relevanten Extrem-, Mittel- und Effektivwerte werden für die dargestellten Größen ermittelt. Sie lassen sich in die Ergebnisgrafik einzeichnen.

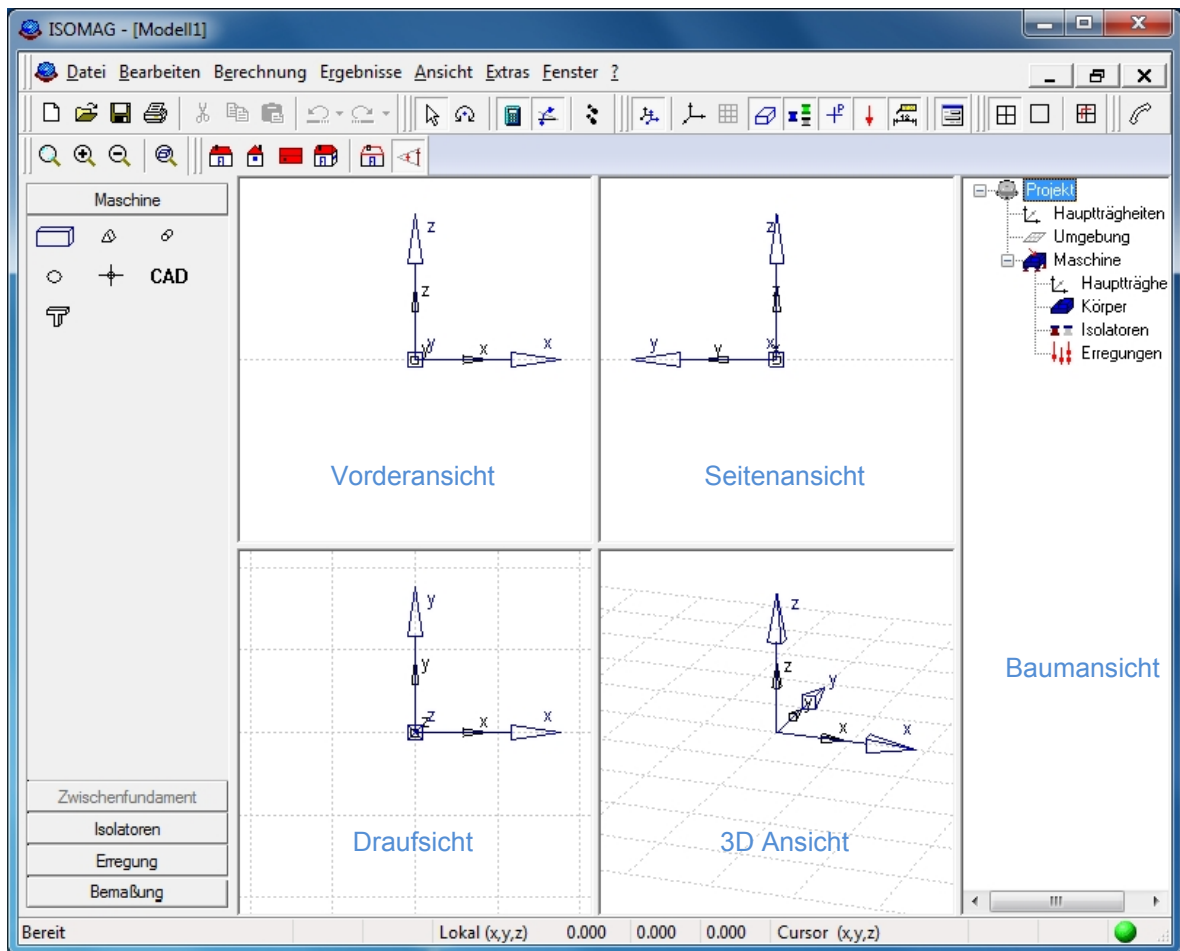
Schließlich sind die Eigen- und Betriebsschwingformen über der Geometrie darstellbar (Animation). So lässt sich schnell erkennen, welche Komponenten auf welche Frequenz entscheidenden Einfluss haben.

Änderungen sind an allen Stellen zu jeder Zeit möglich. Damit kann man das System so gestalten, dass es die gewünschten Eigenschaften aufweist. Unter Umständen sind dazu mehrere Schritte erforderlich bzw. die zufrieden stellende Lösung wird iterativ erreicht.

Mit der doppelten Schwingungsisolierung lässt sich der Isolationsgrad bei tiefer Abstimmung noch verbessern. Wird der gewünschte Isolationsgrad mit der einfachen Isolierung nicht erreicht, obwohl das System bereits tief abgestimmt ist (alle angeregten Eigenfrequenzen liegen unter den Erregerfrequenzen), kann versucht werden, den Isolationsgrad mit einer doppelten Schwingungsisolierung zu erreichen. Dabei hilft der Assistent Doppelte Schwingungsisolierung. Er schlägt ein Fundament und eine Anordnung von Isolatoren vor, falls noch nichts dergleichen vorhanden ist. Belastung und erforderliche Steife der Fundament-Isolatoren in z-Richtung werden bestimmt. Aus der Datenbank kann man geeignete Isolatoren auswählen. Bei Bedarf lassen sich Fundamentgeometrie, Dichte sowie Anzahl und Anordnung der Isolatoren am Modell festlegen. Auch vom Quader abweichende Fundamentgeometrien können beschrieben werden. Sind Fundament und Fundament-Isolatoren im Modell bereits vorhanden, ermöglicht der Assistent Doppelte Schwingungsisolierung die Auswahl von Fundament-Isolatoren mit geeigneter Steifigkeit und Belastbarkeit in z-Richtung.

Spielt die Elastizität des Aufstellortes eine nicht zu vernachlässigende Rolle, können die Eigenschaften der Umgebung (Trägheit und Steifigkeit bzw. Frequenz) in vertikaler Richtung bei der Berechnung der Systemeigenschaften berücksichtigt werden.

## 4.4 Die Programmoberfläche

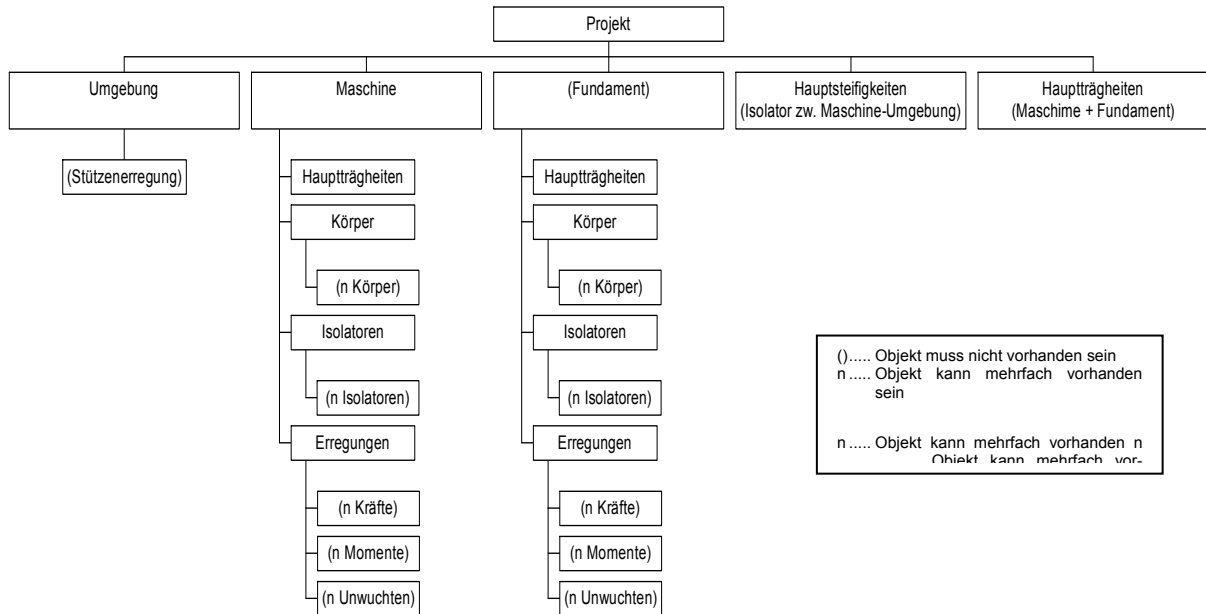


**Abb. 4.2** Die komplette ISOMAG-Programmoberfläche

Das Arbeitsblatt dient der Beschreibung der Modelle (**Abb. 4.2**). Es wird standardmäßig in vier Ansichten dargestellt. Mit der Objektleiste im linken Teil können Sie Objekte erzeugen. Die Baumansicht rechts spiegelt die Objekt-Hierarchie wider. Abschnitt 4.4.4 erläutert die einzelnen Funktionen der Menüleiste. Einige Menüpunkte sind schnell über Schaltflächen der Symbolleiste erreichbar (Abschnitt 4.4.5). Bewegt man den Cursor auf ein Symbol, erscheint nach kurzer Zeit ein Tooltip mit einem Hinweis auf die entsprechende Funktion.

Die Statuszeile am unteren Rand zeigt den aktuellen Zustand des Programms sowie verschiedene Koordinaten an (Abschnitt 4.4.6). Der Punkt auf der rechten Seite gibt Auskunft darüber, ob die Berechnungsergebnisse aktuell sind (grün) oder nicht (rot).

**Objekt-Hierarchie:** Ein Projekt enthält im Allgemeinen eine Vielzahl unterschiedlicher Objekte (Körper, Isolatoren, Erregungen...). Sie sind entsprechend ihrer Funktion bzw. Zugehörigkeit hierarchisch angeordnet. Ausführlich erläutert werden sie im Abschnitt 4.6. Die Lagebeschreibung der einzelnen Objekte bezieht sich immer auf das jeweilige Elternobjekt (**Abb. 4.3**).




**Abb. 4.3** Objekt-Hierarchie

#### 4.4.1 Arbeitsblatt




Auf dem Arbeitsblatt wird das Projekt dargestellt und bearbeitet. Sie können Objekte hinzufügen oder entfernen, grafisch-interaktiv verschieben oder drehen. Objekte lassen sich anklicken, um Parameterdialoge zu öffnen oder Ergebnisse darzustellen (Abschnitt 4.5).

Das Modell kann auf dem Arbeitsblatt sowohl zwei- als auch dreidimensional gezeigt werden.


##### 4.4.1.1 Die 2D Ansichten

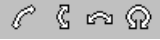
Die Vorder-, Seiten- und Draufsicht sind die 2D Ansichten des Modells. Mit einer der drei Schaltflächen  kann die 3D Ansicht zu einer 2D Ansicht umgeschaltet werden.


Innerhalb der Ansichten können nur der Zoom-Faktor und der sichtbare Ausschnitt vom Nutzer manipuliert werden. Befindet sich der Mauszeiger innerhalb einer der 2D Ansichten, werden die aktuellen Koordinaten in der Statuszeile angezeigt. Neue Objekte können nur in diesen Ansichten abgelegt werden. Maße werden nur in der 2D Ansicht dargestellt, in der sie erzeugt worden sind.

Die Schaltfläche  schaltet den Vier Fenster Modus ein und setzt die Fenstergrößen auf gleiche Werte. Mit  werden die 2D Ansichten so ausgerichtet, dass das komplette Modell sichtbar ist und an gleicher Position erscheint. Die Schaltfläche  stellt den Ein Fenster Modus ein. Dabei werden die 2D Ansichten verdeckt. Nur noch die 3D Ansicht ist sichtbar.

#### 4.4.1.2 Die 3D Ansicht

Diese Ansicht befindet sich im rechten unteren Teil bzw. ist die einzig sichtbare im Ein-Fenster Modus. Mit  kann zwischen Parallel- und Zentralprojektion umgeschaltet werden.

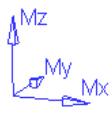
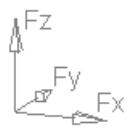



Im Gegensatz zu den 2D Ansichten kann diese Ansicht auch gedreht werden. Dazu wird mit einer der Schaltflächen  ein Rotationsmodus eingeschaltet. Anschließend wird mit der linken Maustaste in die 3D Ansicht geklickt und diese gedrückt gehalten. Beim Bewegen der Maus dreht sich die Ansicht entsprechend.




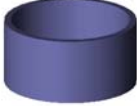





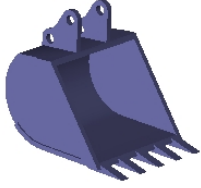










In dieser Ansicht können neue Objekte nur erzeugt werden, wenn mittels  zu einer 2D Ansicht umgeschaltet wird.

#### 4.4.2 Objektleiste


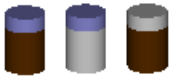





Die Objektleiste im linken Teil des Programmfensters (**Abb. 4.2**) enthält alle Körper für die Modellerstellung. Betätigt man eine der Schaltflächen, werden die verfügbaren Objekte sichtbar (vgl. **Tab. 4.1**). Diese können angeklickt und auf das Arbeitsblatt (in eine der 2D-Ansichten) gelegt werden (vgl. Abschnitt **4.5**).

**Tab. 4.1** Übersicht über alle ISOMAG-Modellobjekte


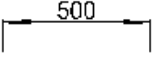
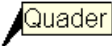
Objekt	Symbol	Wirkt an	Bemerkung
Maschine			<ul style="list-style-type: none"> <li>- ist immer vorhanden</li> <li>- standardmäßig unsichtbar</li> </ul>
Zwischenfundament			<ul style="list-style-type: none"> <li>- wird bei der Erzeugung des ersten Fundamentkörpers erstellt</li> <li>- standardmäßig unsichtbar</li> </ul>
Umgebung			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modellierung des Fußbodens</li> <li>- starr oder elastisch</li> <li>- ist immer vorhanden</li> </ul>
 Quader		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	

	Objekt	Symbol	Wirkt an	Bemerkung
	Prisma		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Hohlzylinder		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Kugel		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Freies Prisma		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	CAD Import		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Isolator		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zw. Maschine/ Umgebung</li> <li>- zw. Maschine/ Fundament</li> <li>- zw. Fundament/ Umgebung</li> </ul>
	Kraft		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Drehmoment		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Unwuchterregung		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	
	Stützererregung		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umgebung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nur einmal vorhanden</li> <li>- Bewegung der Umgebung in wählbarer Richtung</li> <li>- bei nochmaligem Betätigen wird der Parameterdialog geöffnet</li> </ul>

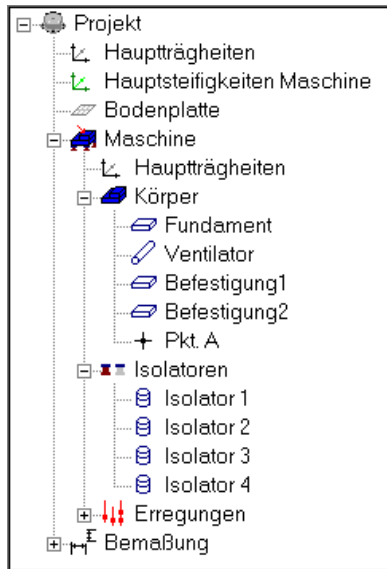
**Tab. 4.2** Objekte, die Ergebnisse der Systemberechnung liefern

Objekt	Symbol	Wirkt an	Bemerkung
 Isolator		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kräfte</li> <li>- Verformungen</li> </ul>
Umgebung			
 Punkt		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewegungsgrößen</li> </ul>
Hauptträgheiten		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projekt</li> <li>- Maschine</li> <li>- Fundament</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schwerpunkt</li> <li>- Lage der Trägheits- hauptachsen</li> <li>- immer vorhanden</li> </ul>
Hauptsteifigkeiten		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Federschwerpunkt</li> <li>- Lage der Steifigkeits- hauptachsen an Ma- schine bzw. Fundament</li> <li>- immer vorhanden</li> </ul>

**Tab. 4.3** Objekte für Zusatzinformationen

Objekt	Symbol	Bemerkung
 Maß		<ul style="list-style-type: none"> <li>- nur in der Ansicht sichtbar, in der es erzeugt wurde</li> </ul>
Label		


### 4.4.3 Baumansicht



Die Baumansicht am rechten Rand des Programmfensters zeigt die vollständige Struktur des jeweiligen Projektes und dient der schnellen Navigation. Die einzelnen Einträge sind die Namen der Objekte.

Analog dem Windows-Explorer kann ein Zweig durch Mausklick auf das "+" oder "-" Symbol ein- bzw. ausgeblendet werden. Gleichzeitig ist das Vorhandensein dieser Symbole Ausdruck dafür, dass sich unter dem entsprechenden Elternobjekt weitere Objekte befinden. Objekte lassen sich hier umbenennen (Klick auf den Namen), markieren und bearbeiten (Doppelklick oder rechte Maustaste). Ausführliche Erläuterungen dazu finden Sie im Abschnitt 4.5.

### 4.4.4 Menüleiste

Dieser Abschnitt stellt die **ISOMAG**-Menübefehle kurz vor. Dabei wird nicht näher auf solche Menüs eingegangen, die zum Windows-Standard gehören. Es sei auf die entsprechenden Handbücher und die Online-Hilfe verwiesen. Über  (sowie die F1-Taste) erreicht man die **ISOMAG**-Hilfe. Einige der folgenden Befehle lassen sich außerdem via Kontextmenü (rechte Maustaste) ausführen.





#### 4.4.4.1 Menü Datei

Das Dateimenü enthält die Menüpunkte zum Anlegen, Öffnen, Schließen, Speichern und Drucken der Arbeitsblätter bzw. Modelle.

#### 4.4.4.2 Menü Bearbeiten

Markierte Objekte können über die Zwischenablage dupliziert und zwischen verschiedenen Projekten ausgetauscht werden. Folgende Tastenkürzel lösen diese Funktionen aus:

- "Umschalt+Entf" schneidet markierte **ISOMAG**-Objekte aus der Struktur aus und kopiert sie in die Zwischenablage,
- "Strg+C" kopiert die markierten Objekte in die Zwischenablage,
- "Strg+V" fügt Objekte aus der Zwischenablage in die Struktur ein.

 Ausschneiden	Umschalt+Entf
 Kopieren	Strg+C
 Einfügen	Strg+V
 Löschen	Entf
Eigenschaften...	Eingabe
Isolator Tabelle...	
Duplizieren...	Strg+D
Label	
Ansicht in die Zwischenablage	

Wenn beim Einfügen von Objekten das Fundament markiert ist, werden die Objekte dem Fundament zugeordnet, andernfalls der Maschine. Damit besteht die Möglich-

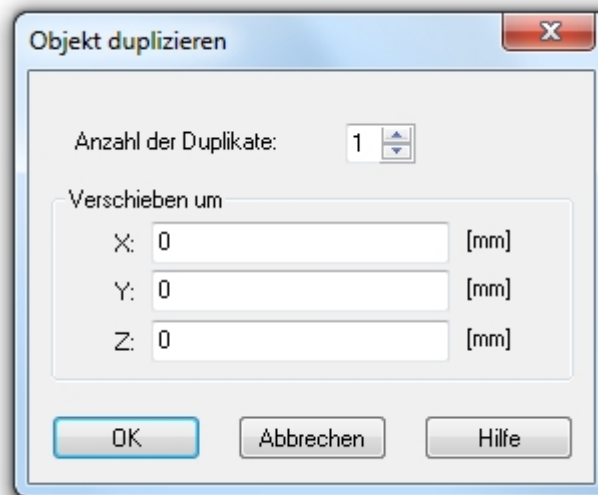


keit, Objekte, die fälschlicherweise der Maschine zugeordnet sind, dem Fundament zuzuweisen.

"**Eigenschaften...**" öffnet den Parameterdialog markierter Objekte (auch möglich über Kontextmenü); siehe dazu die Beschreibung der einzelnen Objekte im Abschnitt 4.6.

"**Isolatoren Tabelle**" öffnet die Isolatorenübersicht des aktuellen Modells. Weitere Informationen dazu befinden sich in Abschnitt 4.6.4.

Über "**Duplizieren...**" bzw. "Strg+D" können markierte Objekte mehrfach dupliziert werden. Im entsprechenden Dialog (**Abb. 4.4**) gibt man die Anzahl der Duplikate sowie ihre Verschiebung an. Die neuen Objekte erhalten automatisch eine eindeutige Bezeichnung, die aus dem Namen des jeweiligen Originals - erweitert um eine Zahl - besteht.



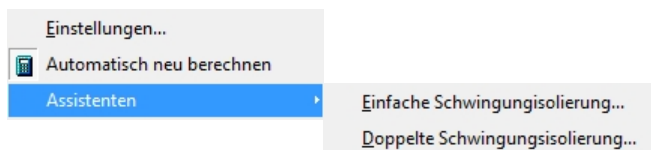
**Abb. 4.4** Dialog-Fenster für das Duplizieren von Objekten


"**Label**" blendet man über den Menüpunkt "Bearbeiten/Label" bzw. via Kontextmenü ein und aus. Sind mehrere Objekte markiert, wird der Befehl auf alle diese angewendet. Die Position kann durch Klicken auf den Text und Verschieben beliebig verändert werden. Die Verschiebung wirkt sich dabei auf alle Ansichten aus. Ausführliche Erläuterungen sind im Abschnitt 4.5.4.4 zu finden.

Der Befehl "**Ansicht in die Zwischenablage**" erstellt ein Bild der aktuellen 3D Ansicht(en) und legt dieses Bild in der Windows Zwischenablage ab. Es kann dann in einem beliebigen Programm eingefügt werden. Aus Gründen der Qualität ist die Auflösung des generierten Bilds höher als die Bildschirmauflösung.

#### 4.4.4.3 Menü Berechnung

Über diesen Menüpunkt können die Assistenten für die einfache und die doppelte Schwingungsisolierung gestartet werden. Sie unterstützen den Anwender bei der Auswahl geeigneter Isolatoren. Standardmäßig wird die Berechnung nach jeder Veränderung am Modell gestartet. Bei nicht erfolgreich abgeschlossener Berechnung erscheint eine entsprechende Mitteilung. In den Titelleisten aller Ergebnisfenster wird dann "- nicht aktuell -" angezeigt. Der Punkt in der Statuszeile bleibt rot. Die angezeigten Ergebnisse sind die des letzten erfolgreichen Berechnungsdurchlaufes.





Die automatische Berechnung lässt sich über die Schaltfläche  deaktivieren. Das ist insbesondere dann zu empfehlen, wenn sich das Modell noch in der Entstehungsphase befindet. Eine Neuberechnung wird dann nur ausgeführt, wenn ein neues Ergebnis zur Anzeige gebracht oder die Animation gestartet wird (vgl. Abschnitt 4.7).

Der Menüeintrag "**Einstellungen...**" öffnet den Dialog für die Berechnungseinstellungen des aktuellen Modells. Diese werden in Abschnitt 4.7.1 beschrieben.

#### 4.4.4.4 Menü Ergebnisse

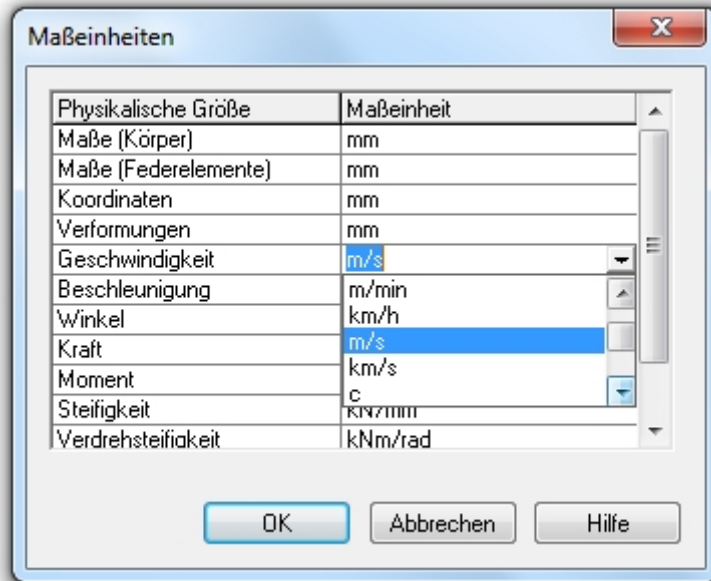
Einige ausgewählte Ergebnisse - Hauptträgheiten, Steifigkeiten, Eigenfrequenzen - lassen sich über diesen Menüpunkt anzeigen. Weitere Resultate erhält man über das Kontextmenü. Für eine ausführliche Beschreibung sei auf die Abschnitte 4.8 und 5.3 verwiesen.

#### 4.4.4.5 Menü Ansicht

Wie bereits im Abschnitt 4.4.1 erläutert, können Sie hier zwischen dem Vier- und dem Ein-Fenster-Modus wechseln. Auch lassen sich die Ansichten so ausrichten, dass das komplette Modell sichtbar ist. Die entsprechenden Schaltflächen  und  sind auch in der Symbolleiste (Toolbar) zu finden. In diesem Menü lässt sich auch die Statusleiste zu- bzw. abschalten.

#### 4.4.4.6 Menü Extras

Um "**Maßeinheiten**" im Programm zu ändern, klickt man in die entsprechende Zeile und wählt aus der Listbox, die erscheint, die gewünschte Einheit aus (**Abb. 4.5**). Alle Größen im Modell werden dann in die neue Einheit umgerechnet. Nachfolgende Eingaben erfolgen in der neuen Einheit.



**Abb. 4.5** Maßeinheiten

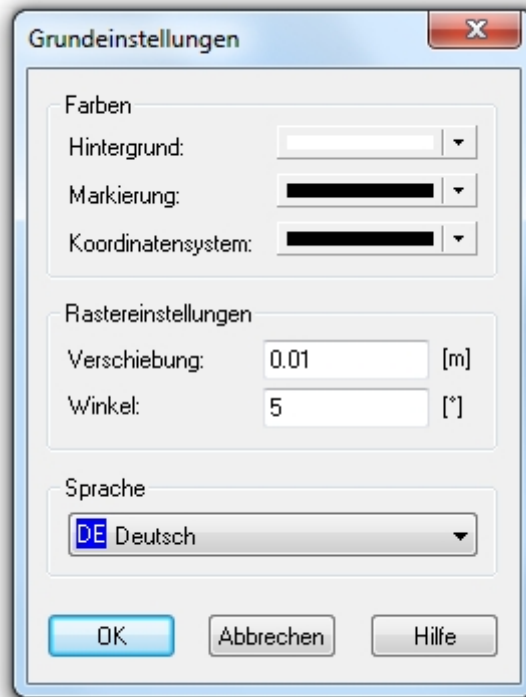
Unter den allgemeinen **"Projekteigenschaften"** können die Projekte beliebig beschrieben werden (**Abb. 4.6**).



**Abb. 4.6** Projekteigenschaften

Unter dem Menüpunkt **"Grundeinstellungen"** lassen sich die Farbe des Arbeitsblatt-Hintergrundes, der Körperkanten von markierten Objekten sowie des globalen Koordinatensystems (GK) festlegen. Die Rastereinstellungen dienen als Positionierhilfe für grafisch-interaktive Verschiebungen und Verdrehungen.

Auch die Einstellung der Sprachversion ist hier möglich. Beachten Sie, dass nach einer Sprachänderung ein Neustart von ISOMAG erforderlich ist.











**Abb. 4.7** Grundeinstellungen









Der Menüpunkt "**Standardwerte Isolatoren**" öffnet einen Dialog der dem Eigenschaftsdialog der Isolatoren ähnelt. Bei den hier angezeigten Werten handelt es sich um die Standardwerte mit denen jeder neue Isolator versehen wird. Die Standardwerte können geändert werden, um beispielsweise eine bestimmte Steifigkeit für die neu angelegten Isolatoren vorzugeben. Die Werte jeder einzelnen Seite lassen sich mit dem Schalter "Zurücksetzen" auf den Auslieferungszustand zurücksetzen.


#### 4.4.4.7 Menü Fenster

Das Menü "Neues Fenster" erzeugt eine Kopie aller Ansichten. Der Befehl "Überlappend" sortiert die geöffneten Fenster so, dass alle Titelleisten auf dem Arbeitsblatt sichtbar sind, während mit "Übereinander" alle Fenster vollständig zu sehen sind.

#### 4.4.5 **Symbolleiste**

Die Symbolleiste (Toolbar) befindet sich unter der Menüleiste (**Abb. 4.2**). Mit ihrer Hilfe können Sie häufig vorkommende Aktionen schnell ausführen. Dazu genügt ein Klick auf die entsprechende Schaltfläche. Ein Teil dieser Operationen ist auch über Menüs bzw. Tastenkombinationen möglich. Schaltflächen, die keinen Menübefehlen entsprechen, sind in **Tab. 7.3** erläutert. Dazu zählen unter anderem die Befehle "Markieren und verschieben" () , diverse Schaltflächen zum Drehen (, , ) sowie zum Vergrößern und Verkleinern (, , ) der Ansichten. Mit  lässt sich festlegen, ob die Objekte ausgefüllt oder nur als Drahtgitter zu sehen sind. Als

Besonderheit sei noch Folgendes erwähnt: Die Symbole , , , , ,  und  dienen dazu festzulegen, ob die Koordinatensysteme, Umgebung, Körper, Isolatoren, Punkte, Erregungen sowie Maße und Labels markierbar sein sollen oder nicht. Um z. B. sicher zu stellen, dass nur eine Gruppe von Isolatoren markiert wird, kann man alle anderen Objekte als "nicht markierbar" definieren. Der Button  blendet die Ergebniskoordinatensysteme der Hauptträgheiten und Hauptsteifigkeiten aus.

Mit der Schaltfläche  kann eingestellt werden, ob die statischen Verformungen berechnet werden sollen. Das Nichtberechnen ist insbesondere bei Anlagen mit automatischer Niveauregulierung sinnvoll.

Nach einem Klick mit der rechten Maustaste auf die Symbolleiste können Sie Gruppen von Funktionen ein- und ausblenden.

#### 4.4.6 Statusleiste

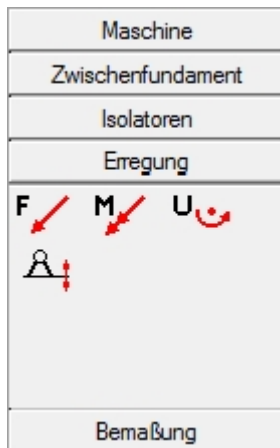
In der Statusleiste am unteren Rand des Programmfensters - im Menü "Ansicht" zu- bzw. abschaltbar - werden verschiedene Koordinaten angezeigt:

- die aktuelle Cursorposition (nur in den 2D-Ansichten, die dritte Koordinate wird nicht angezeigt),
- die lokalen Koordinaten des markierten Objektes. Ist eine Gruppe von Objekten markiert, erscheinen die lokalen Koordinaten des zuletzt markierten Objektes (vgl. Abschnitt 4.5.2),
- die relativen Werte (zurückgelegte Wege  $dx$ ,  $dy$  und  $dz$  sowie Winkel  $d\phi$ ) beim Verschieben und Verdrehen bezüglich der lokalen Koordinaten. Dies ist bei der Positionierung von Objekten hilfreich.


Der Punkt auf der rechten Seite zeigt an, ob die Berechnungsergebnisse aktuell sind (grün) oder nicht (rot). Bewegt man den Cursor durch die einzelnen Menüs, erhält man in der Statusleiste außerdem Informationen zum jeweiligen Menüpunkt. Bei mehreren markierten Objekten wird außerdem deren Anzahl angezeigt

## 4.5 Der Modellaufbau

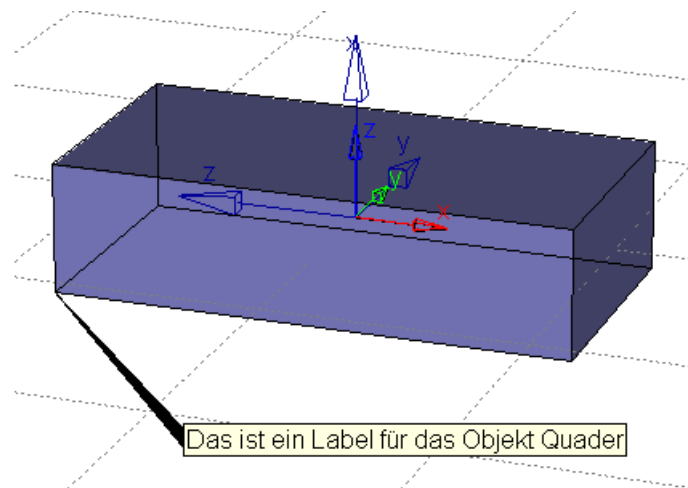
### 4.5.1 Erzeugen von Objekten



**Abb. 4.8** Objekt-leiste

Um ein Objekt zu erzeugen, wird in der linken Leiste auf eine der Objektgruppen geklickt. Die verfügbaren Schaltflächen erscheinen (Beispiel Maschine: Quader, Prisma, Hohlzylinder, Kugel, Punkt, CAD Import und freies Prisma). Tooltips geben einen kurzen Hinweis auf das entsprechende Objekt. Das Betätigen einer der Schaltflächen versetzt **ISOMAG** in den Einfügemodus (erkennbar an einem Pluszeichen am Cursor). Durch einen Klick in eine der 2D-Ansichten erzeugen Sie das Objekt. Es erhält die Koordinaten der aktuellen Mausposition (vgl. Abschnitt 4.4.6) unter Berücksichtigung der aktuellen Rastereinstellung ("Extras/Grundeinstellungen"). Die unbekannte dritte Koordinate wird dabei Null gesetzt. Ist die Schaltfläche  eingerastet, öffnet sich automatisch der Parameterdialog des neuen Objektes (vgl. Abschnitt 4.5.3).

Mit dem ersten Fundamentkörper wird automatisch ein Fundament erzeugt. Außerdem wirken - falls der Nutzer dies wünscht - alle Federn zwischen Maschine und Umgebung von nun an zwischen Maschine und Fundament (Abfrage: "Es existieren Federelemente zwischen Maschine und Umgebung. Sollen diese ab jetzt zwischen Maschine und Zwischenfundament wirken?"). Um eine Feder zwischen Fundament und Umgebung zu erzeugen, muss vorher das Fundament markiert werden.



**Abb. 4.9** Beispiel für ein Label


Objektnamen identifizieren die einzelnen Modellobjekte. Sie werden in den vier Ansichten in so genannten **Labels** dargestellt. Label blendet man über den Menüpunkt "Bearbeiten/Label" bzw. via Kontextmenü ein und aus. Sind mehrere Objekte markiert, wendet **ISOMAG** den Befehl auf alle diese an (vgl. Abschnitt 4.5.4.4).

Zum Erzeugen eines **Maßes** müssen Anfangs- und Endpunkt festgelegt werden. Dazu klicken Sie jeweils auf die entsprechende Körperkante des zu bemaßenden Objektes. Das Programm wählt den Punkt auf der Kante, der dem Mausklick am nächsten liegt. Der Vorgang kann nach dem ersten Mausklick durch ESC abgebrochen werden. Wie die Anordnung von Maßlinien und Maßzahlen verändert werden kann, ist im Abschnitt **4.5.4.3** erläutert.

## 4.5.2 Markieren von Objekten

Zum Bearbeiten, Kopieren oder Löschen von Objekten müssen diese markiert werden. Dabei kann es sich sowohl um ein einzelnes Objekt als auch um eine ganze Gruppe handeln. Letzteres hat den Vorteil, dass sich beispielsweise bequem mehrere Isolatoren gleichzeitig parametrieren oder sich gleichartige Ergebnisse verschiedener Objekte schnell darstellen lassen. Alle markierten Objekte erscheinen konturhaft im Vordergrund. Die Farbe der Kontur ist im Dialog "Extras / Grundeinstellungen" festgelegt. Das zuletzt markierte Objekt wird rot dargestellt und sein Bezugskordinatensystem angezeigt. Die Lagekoordinaten dieses Objektes sowie die Anzahl der markierten Objekte sind in der Statuszeile zu sehen.

### 4.5.2.1 Markieren in einer der Modellansichten

Einzelne Objekte markiert man durch einen Klick mit der linken Maustaste. Wird das Objekt als Kontur dargestellt ( in der Symbolleiste), muss dazu eine Körperkante getroffen werden. Liegen mehrere Objekte hintereinander, wird das am weitesten vorn liegende Objekt selektiert. Wollen Sie mehrere Objekte markieren, müssen Sie während des Klickens die Shift-Taste gedrückt halten. Klickt man mit gedrückter Shift-Taste auf ein bereits selektiertes Objekt, wird es wieder deselektiert. Um die Markierung aufzuheben, genügt ein Klick auf eine freie Fläche.

Mehrere Objekte können auch durch Aufziehen eines Rechtecks markiert werden. Dabei darf sich der Mauszeiger beim Klicken nicht über einem Objekt befinden, da dieses sonst verschoben wird. Es werden alle Objekte markiert, die ganz oder teilweise innerhalb des Rechtecks liegen. Das am weitesten vorn liegende Objekt wird rot dargestellt. In den Modellansichten lassen sich nur sichtbare Objekte markieren.

### 4.5.2.2 Markieren in der Baumansicht

Die Markierung geschieht analog dem Windows-Explorer. Ein einzelnes Objekt aktiviert man durch einen Klick mit der linken Maustaste. Mit gedrückter Strg-Taste können weitere Objekte selektiert/deselektiert werden, mit der Shift-Taste ist eine von-bis-Auswahl möglich. Dabei werden nur die sichtbaren (ausgeklappten) Objekte berücksichtigt.

### 4.5.3 Parametrieren von Objekten

Objekte verfügen über mehrseitige Dialoge zur Parametrierung. Man öffnet diese mittels

- Doppelklick auf das Objekt in der Modell- oder Baumansicht,
- Kontextmenü ("Eigenschaften"),
- Menüleiste ("Bearbeiten/Eigenschaften") oder
- Enter-Taste (Objekt zuvor markieren!).

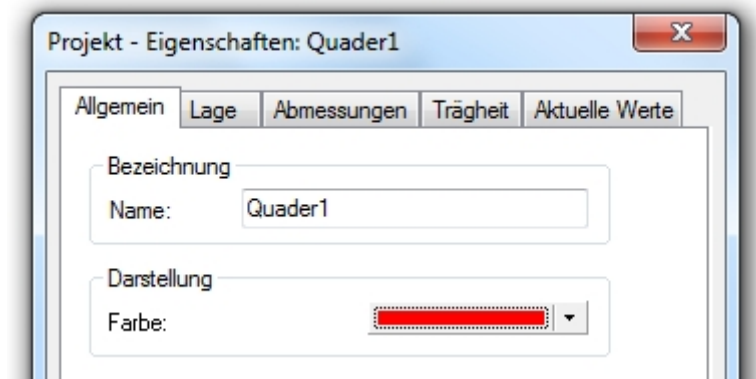
Bei allen Parametern ist sowohl die Eingabe einfacher Zahlen als auch mathematischer Funktionen (z. B.  $\sin(\pi/2)$  oder  $3+4$ ) möglich (vgl. Abschnitt 7.1). Man beachte, dass dann die physikalische Einheit automatisch auf die jeweilige SI-Einheit umspringt.

Durch "Übernehmen" überträgt das Programm die Daten vom Dialog auf die Objekte. Die Anzeige wird aktualisiert, d. h., die Änderungen sind am Projekt sichtbar, ohne dass es **ISOMAG** zunächst neu berechnet. "Abbrechen" macht diese Aktion rückgängig und stellt den Zustand vor Öffnen des Dialogs wieder her.

Die folgenden Punkte beschreiben die Registerkarten "Allgemeine Eigenschaften", "Lage" und "Abmessungen", die für alle Objekte nahezu identisch sind. Die übrigen Parameter werden an entsprechender Stelle im Abschnitt 4.5 erläutert. Es können auch mehrere Objekte gleichzeitig parametrieren werden, mehr dazu im Abschnitt 4.5.3.4.

#### 4.5.3.1 Allgemeine Eigenschaften

Hier lassen sich beliebige Namen vergeben sowie die Farbe der Objekte wählen.



**Abb. 4.10** Allgemeiner Parameterdialog

Der Name lässt sich per Label an das Objekt antragen (**Abb. 4.9**).

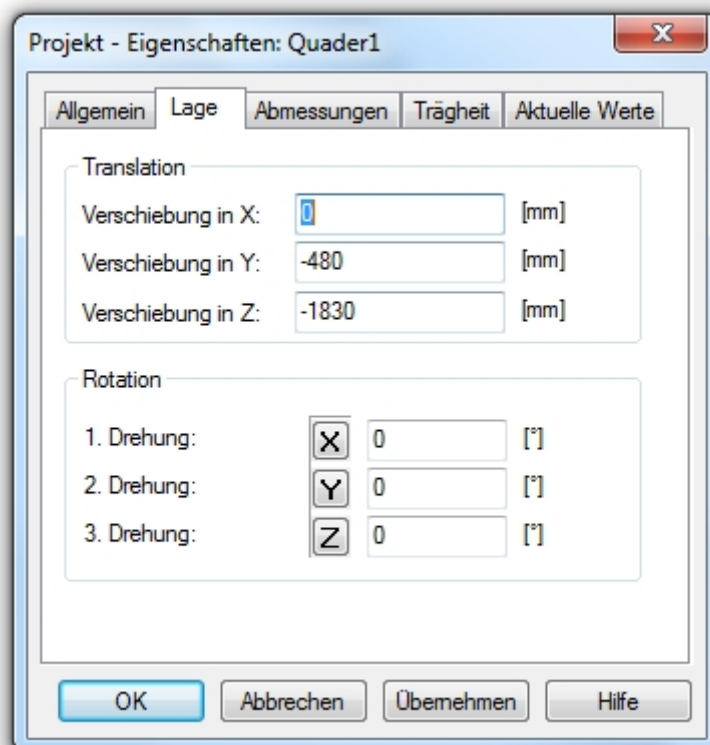
#### 4.5.3.2 Lage

Wird die Registerkarte geöffnet, zeigen die Werte zunächst die momentane Lage des Objektbezugspunktes an - **relativ zum Elternobjekt**. Man kann sowohl eine Ver-



schiebung in x-, y- und/oder z-Richtung als auch eine Drehung um die x-, y- und/oder z-Achse bestimmen. Nacheinander wird um die angegebenen Winkel gedreht. Es ist zu beachten, dass sich beispielsweise bei einer Drehung um x die Lage der anderen Achsen ändert. Eine sich anschließende Drehung um z bezieht sich dann auf die gedrehte Lage der z-Achse. Dabei können Sie die Standard-Reihenfolge x, y, z ändern: Fährt man mit der Maus über eine der Schaltflächen, verwandelt sich der Zeiger in einen Pfeil, der nach oben oder unten weist - beide Koordinaten tauschen ihren Platz. **Man achte auf richtige Vorzeichen!**

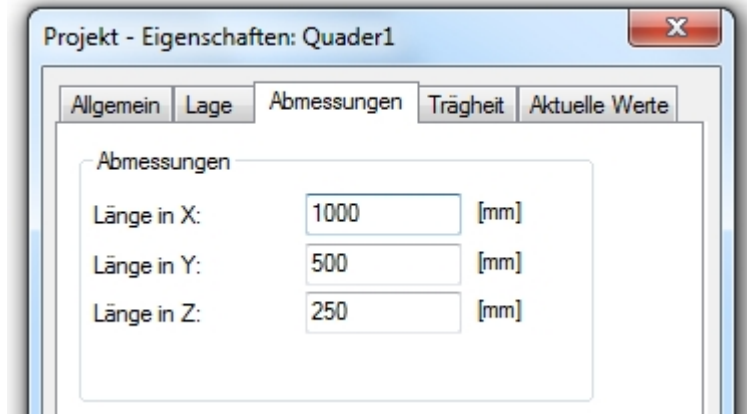
**Ausnahmen:** Im Parameterdialog der Fußpunkterregung können nur rotatorische, bei Maschine und Fundament nur translatorische Werte eingegeben werden.



**Abb. 4.11** Dialog zur Bestimmung der Lage eines Körpers

#### 4.5.3.3 Abmessungen

Die Eingaben unter dieser Registerkarte sind objektabhängig. So sind als Parameter bei einem Quader drei Längen einzugeben. Bei einer Kugel ist der Durchmesser einzugeben.



**Abb. 4.12** Dialog zur Bestimmung der Abmessungen eines Körpers

**Ausnahmen:** Bei **Isolatoren** muss zunächst festgelegt werden, ob es sich um eine quaderförmige oder eine zylindrische Form handelt (vgl. Abschnitt 4.6.3). Bei den unterschiedlichen Formen der **Erregung** kann man die Pfeillänge variieren, bei der **Umgebung** sind Angaben zur Länge in X- und Y-Richtung, zur Dicke und zur Kachellänge zu machen (vgl. Abschnitt 4.6.4.6). Die Kacheln sind dabei immer quadratisch, die Größenangabe dient nur der Visualisierung. Sie geht nicht in die Berechnung ein.

#### 4.5.3.4 Mehrfachparametrierung

Auch eine **Mehrfachparametrierung** ist möglich: Sind ausschließlich **Körper** (Quader, Prisma, Zylinder und Kugel) markiert (vgl. Abschnitt 4.5.2), können in der Registerkarte "Lage" die Werte für Verschiebung und Drehung eingegeben werden, die dann für alle Körper gelten. Damit können z. B. Körper in einer Koordinatenrichtung ausgerichtet werden.

Haben Sie ausschließlich **Isolatoren** markiert, öffnet sich der komplette Parameterdialog. Soll also z. B. ein Fundament mit vier Federn gleichen Typs ausgestattet werden, bedarf es dafür nur der einmaligen Eingabe aller Werte.

Sind **verschiedenartige** Objekte markiert, bezieht sich der Dialog auf das zuletzt markierte Objekt (rot dargestellt).

**Tab. 4.4** Die Tabelle zeigt das Verhalten der Bedienelemente bei Mehrfachparametrierung


Bedienelement	Inhalt ist gleich	Inhalt ist unterschiedlich
Eingabefeld	Länge in Z: <input type="text" value="100"/> [mm]	Länge in Z: <input type="text"/> [mm]
Auswahlfeld	Ansatz: <input type="text" value="Ohne Dämpfung"/> ▼	Ansatz: <input type="text"/> ▼
Checkbox	<input checked="" type="checkbox"/> Kennlinie oder <input type="checkbox"/> Kennlinie	<input checked="" type="checkbox"/> Kennlinie

Wenn der Nutzer Bedienelemente, die unterschiedliche Inhalte darstellen, nicht verändert, behalten die Bedienelemente ihren jeweiligen Inhalt bei.

## 4.5.4 Manipulieren von Objekten

### 4.5.4.1 Verschieben

Alle Objekte sind - abhängig von der gewählten Rastereinstellung ("Extras/Grundeinstellungen") - in den Modellansichten frei positionierbar. Zum Verschieben gehen Sie wie folgt vor:


- Einstellen des "Markieren und verschieben" Modus mittels ,
- Objekt markieren (vgl. Abschnitt 4.5.2) und bei gedrückter linker Maustaste in die neue Position verschieben,
- Maustaste loslassen.
- Alternative: Markierte Objekte mit den Cursortasten verschieben. Dazu muss der Mauszeiger sich in einer 2D-Ansicht befinden, auf die sich auch die Eingabe bezieht.

Die aktuelle Position (in lokalen Koordinaten) und die relative Verschiebung des zuletzt markierten Objektes sowie die Position des Cursors werden in der Statuszeile angezeigt. Das Verschieben kann durch Betätigen von ESC oder der rechten Maustaste abgebrochen und rückgängig gemacht werden.

Die mit der Bemaßung gegebenen Möglichkeiten unterstützen komfortabel das maßgenaue Positionieren (vgl. Abschnitt 4.5.4.3).

### 4.5.4.2 Drehen

Zum Drehen gehen Sie wie folgt vor:

- Einstellen des "Markieren und Drehen" Modus mittels ,
- Objekt(e) markieren (s.o.),
- markiertes Objekt mit linker Maustaste anklicken, Taste gedrückt halten und Objekt(e) drehen,
- Maustaste loslassen.

Die Verdrehung erfolgt dabei um das jeweilige Bezugskordinatensystem der Objekte.

Die aktuelle Winkellage (in lokalen Koordinaten) und die relative Verdrehung des zuletzt markierten Objektes werden in der Statuszeile angezeigt. Das Verdrehen kann durch Betätigen von "ESC" oder der rechten Maustaste abgebrochen werden. Die Reihenfolge der Drehwinkel im Parameterdialog wird nach der Drehung auf die Standard-Reihenfolge x-y-z gestellt.

#### 4.5.4.3 Bemaßung

Soll die Lage von Maßlinien und/oder Maßzahlen manipuliert werden, verschiebt man sie bei gedrückter Maustaste an die gewünschte Position. Die automatische Anordnung kann im Parameterdialog des jeweiligen Maßes wiederhergestellt werden.

Im allgemeinen Dialog Bemaßung (Baumansicht) lassen sich die Farbe der Maßlinien und -zahlen, der Abstand zur Körperkante und zum Maß, die Pfeillänge und Schriftgröße festlegen. Diese Einstellungen gelten für alle Maße. Verändert man Abmessungen oder die Lage eines Objektes, werden davon betroffene die Bemaßungen automatisch angepasst. Dies kann man nutzen, um beispielsweise Objekte grafisch und maßgenau zu positionieren. Man muss dabei nicht (wie in den Parameterdialogen) über die Schwerpunktlagen gehen, sondern kann jedes darstellbare Maß, z.B. auch Kantenabstände, einstellen. Benutzt man außerdem zum Verschieben die Cursortasten, kann genau um eine Rastereinheit, also sehr feinfühlig, positioniert werden.

#### 4.5.4.4 Labels

Die Anzeige der Objektnamen in den Labels können Sie im Menü "Bearbeiten" ein- und ausschalten. Bei gedrückter Maustaste lässt sich der Text beliebig verschieben. Dabei verändert sich die Position in allen vier Ansichten zugleich. Auch der Anknüpfungspunkt des Labels ist manipulierbar: Man klickt auf das Anknüpfungsdreieck und wählt - bei gedrückter Maustaste - einen der rot dargestellten Alternativpunkte. Beim Bewegen der Maus dockt das Label an den Punkt an, der dem Mauszeiger am nächsten liegt. Auch hier wirkt sich die Änderung auf alle anderen Ansichten aus.

Die Baumansicht (Abschnitt **4.4.3**) ist aus den einzelnen Objektnamen aufgebaut. Im Druckprotokoll dienen sie als Überschrift für die einzelnen Objekte. Die Namen werden vom Programm automatisch generiert, können jedoch jederzeit geändert werden. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Klicken Sie in der Baumansicht ein markiertes Objekt ein weiteres Mal an. Sie erhalten die Möglichkeit, einen neuen Namen einzugeben. Beenden Sie die Eingabe mit "Enter".
2. Ändern Sie den Namen auf der ersten Seite des Parameterdialoges.

Wurde ein Objektname geändert, wirkt sich dies an allen Stellen im Programm aus (Struktur, Baum, Druckprotokoll...).

#### 4.5.5 **Löschen von Objekten**

Markierte Modellobjekte werden durch Betätigen der Taste "Entf" bzw. via Kontextmenü ohne Rückfrage gelöscht. Das Projekt, die Hauptsteifigkeiten und Hauptträgerheiten, die Umgebung sowie die Maschine können nicht gelöscht werden. Wird das Zwischenfundament gelöscht, kann diese Aktion nicht rückgängig gemacht werden

#### 4.5.6 Kopieren, Ausschneiden, Einfügen, Duplizieren von Objekten

Markierte Objekte (vgl. Abschnitt 4.5.2) können über die Zwischenablage kopiert und zwischen verschiedenen Projekten ausgetauscht werden.

Folgende Tastenkürzel lösen diese Funktionen aus:



- "Strg+X" schneidet die markierten Objekte aus der Struktur aus und kopiert sie in die Zwischenablage,
- "Strg+C" kopiert die markierten Objekte in die Zwischenablage,
- "Strg+V" fügt die **ISOMAG**-Objekte aus der Zwischenablage in die Struktur ein.

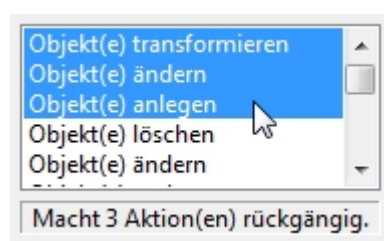
Die Aktionen können auch über das Menü "Bearbeiten" sowie einige davon via Kontextmenü ausgelöst werden.

Wenn das Fundament beim Einfügen von Objekten markiert ist, werden diese dem Fundament zugeordnet. Damit besteht die Möglichkeit, Objekte, die fälschlicherweise der Maschine zugeordnet sind, dem Fundament zuzuweisen.

Markierte Objekte können auch **dupliziert** werden. Dazu wird mit "Strg+D" oder über den Menüpunkt "Bearbeiten/Duplizieren..." der entsprechende Dialog geöffnet. Dort kann die Anzahl der Duplikate sowie ihre Verschiebung in x-, y- und z-Richtung angegeben werden. Die neuen Objekte erhalten automatisch eine eindeutige Bezeichnung, die aus dem Namen des jeweiligen Originals - erweitert um eine Zahl - besteht. Sie können beliebig umbenannt werden.

#### 4.5.7 Aktionen rückgängig machen und wiederherstellen

Um eine oder mehrere der in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Aktionen rückgängig zu machen kann die Undo Funktion verwendet werden. Sie ist über die Schaltflächen  bzw.  verfügbar. Das Ausführen der Undo Funktion stellt den Modellzustand vor der letzten Aktion wieder her, die rückgängig gemachte Aktion kann anschließend über die Redo Funktion wiederhergestellt werden. Über die Pfeile neben den Schaltern in der Toolbar öffnet sich das Unod/Redo Menü. Dieses Menü listet alle aufgezeichneten Aktionen auf, es lassen sich hier auch mehrere zusammenhängende Aktionen zurücksetzen bzw. wiederherstellen.



**Abb. 4.13** Aktionsmenü für Undo/Redo

Bei den aufgezeichneten Aktionen kann es sich um eine oder mehrere Änderungen an einem oder mehreren Objekten handeln. Beispielsweise werden alle Änderungen im Eigenschaftendialog zu einer Aktion zusammengefasst sobald der Dialog ge-

geschlossen wird, und nicht einzeln aufgelistet. Es ist zu beachten, dass die Anzahl der aufgezeichneten Aktionen auf 20 begrenzt ist.

## 4.6 Beschreibung der Objekte

### 4.6.1 Maschine und Fundament

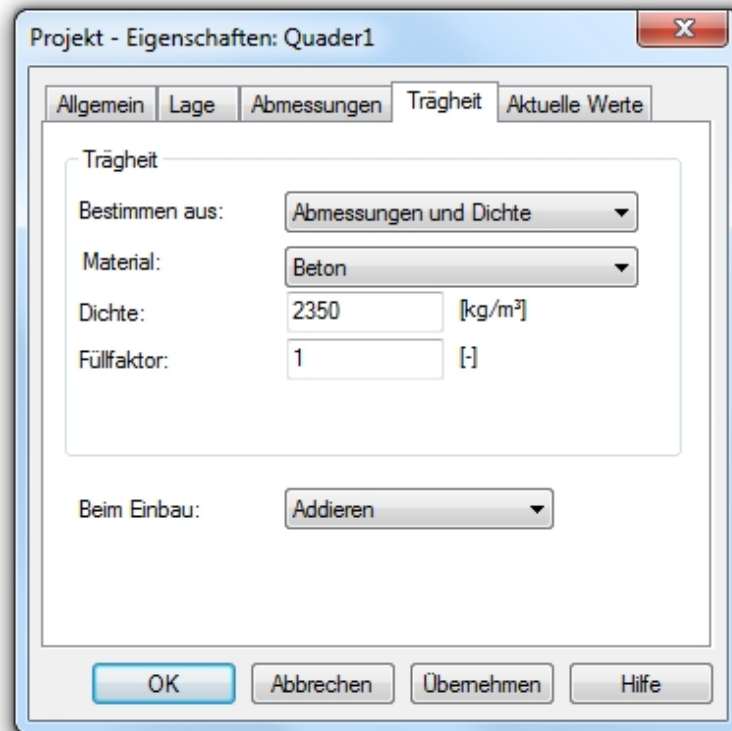
Maschine und Fundament sind die Elternobjekte der jeweils zugehörigen Körper, Isolatoren und Erregungen (siehe **Abb. 4.3**). Verändert man die Lage von Maschine und Fundament, verschieben sich alle Kindobjekte entsprechend. Maschine und Fundament können also benutzt werden, um die Lage zueinander zu verändern. Des Weiteren ist es möglich, die Trägheitseigenschaften zu parametrieren.

### 4.6.2 Körper

Für die Beschreibung der Trägheitseigenschaften des zu isolierenden, in sich starren Systems gibt es in **ISOMAG** vielfältige Möglichkeiten. Wenn die Trägheitseigenschaften des Systems nicht bekannt sind, lässt man sie vom Programm ermitteln. Das Programm arbeitet mit geometrischen Grundkörpern (Quader, Prisma, Hohlzylinder, Kugel), für die die Trägheitseigenschaften (Masse, Hauptdrehträgheiten, Lage des Schwerpunktes und Hauptträgheitsachsen) bekannt sind. Im Programm beschreibt man diese Grund- bzw. Teilkörper und setzt sie zur Gesamtstruktur zusammen (vgl. Abschnitt **4.5.1**).

#### **Parameterdialog zur Beschreibung der Trägheit**

Die Registerkarte "Trägheit" im Parameterdialog beschreibt die Trägheitseigenschaften. Verschiedene Optionen stehen zur Verfügung (vgl. **Abb. 4.14**).



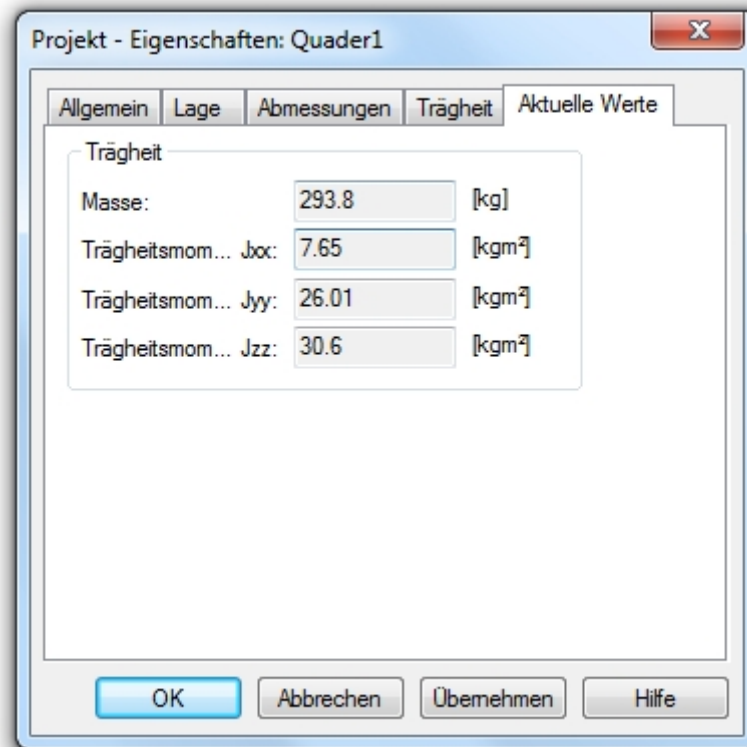
**Abb. 4.14** Parameterdialog zur Beschreibung der Trägheit von Körpern

Wird die Trägheit aus „**Abmessungen und Dichte**“ bestimmt, geht man davon aus, dass die Masse gleichmäßig über den Teilkörper verteilt ist. Der Füllfaktor kann Ungleichmäßigkeiten in der Masseverteilung näherungsweise berücksichtigen.

**Tab. 7.1** gibt Auskunft über die zu Grunde gelegten Beziehungen. Die Dichte kann direkt eingetragen oder aus der Datenbank übernommen werden. Dazu wird der gewünschte Werkstoff in der Combobox ausgewählt. Enthält die Liste nicht den benötigten Werkstoff, kann dieser in der Datenbank ergänzt werden.

Standardmäßig werden die Trägheiten eines Teilkörpers zu den Trägheiten bereits vorhandener Körper addiert (Option "**Beim Einbau: Addieren**"). Um beispielsweise Bohrungen oder Aussparungen zu berücksichtigen, können die Trägheiten von Teilkörpern beim Einbau auch subtrahiert werden.

Die errechneten Werte für die Masse und die Drehträgheiten des Teilkörpers sind auf der letzten Dialogseite zu sehen (**Abb. 4.15**). Dabei werden nur  $J_{xx}$ ,  $J_{yy}$  und  $J_{zz}$  dargestellt. Sind die Deviationsmomente ungleich Null, wie das für  $J_{xy}$  beim Prisma der Fall ist, werden diese vom Programm exakt berücksichtigt, jedoch nicht angezeigt.



**Abb. 4.15** Anzeige der aktuellen Trägheitswerte für den Teilkörper



### 4.6.3 Erweiterte Körper

Neben den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen einfachen Grundkörpern ist es auch möglich, erweiterte Körper in **ISOMAG** zu verwenden. Diese zeichnen sich darin aus, dass sie auch komplexere Formen besitzen können, womit allerdings auch die alleinige Angabe der Hauptdiagonalelemente für die Beschreibung der Trägheit im Allgemeinen nicht mehr ausreicht. Der Dialog für die Trägheitseigenschaften erlaubt es für solche Objekte daher, die komplette Trägheitsmatrix anzugeben, siehe **Abb. 4.16**. Da die Trägheitseigenschaften der Einzelkörper sich direkt auf die Trägheit von Verbundkörpern (Maschine, Fundament) auswirken, kann diese auch in deren Eigenschaftsdialogen vollständig beschrieben werden.

The screenshot shows a software dialog box titled "Projekt - Eigenschaften: Freies Prisma1". It has several tabs: "Allgemein", "Lage", "Abmessungen", "Trägheit", and "Aktuelle Werte". The "Trägheit" tab is active. Inside this tab, there are several input fields and a table:

- "Bestimmen aus:" is set to "Eingabe".
- "Masse:" is 487.625 [kg].
- "Schwerpunkt:" has three input fields with values 0, -284.03614, and 250, and a unit dropdown set to "mm".
- "Trägheitsmatrix:" is a table with three columns labeled  $I_x^*$ ,  $I_y^*$ , and  $I_z^*$ .
 

	$I_x^*$	$I_y^*$	$I_z^*$
$I_x^*$	35.262814	-3.3971668	0
$I_y^*$	-3.3971668	36.092083	0
$I_z^*$	0	0	51.037189

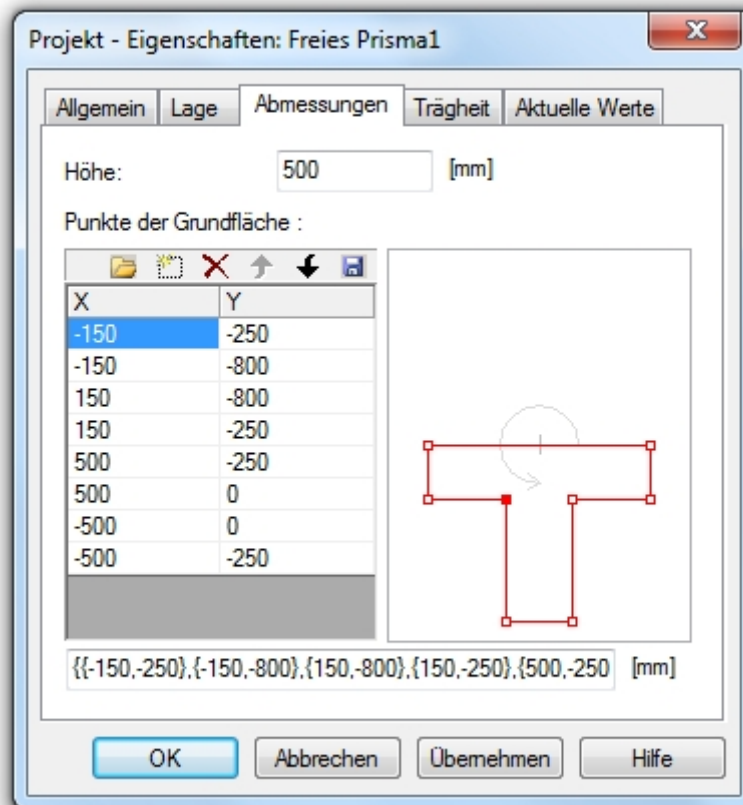
 The unit for the matrix is "kgm²".
- "Beim Einbau:" is set to "Addieren".

At the bottom of the dialog are buttons for "OK", "Abbrechen", "Übernehmen", and "Hilfe".

**Abb. 4.16** Vollständige Trägheitseigenschaften

#### 4.6.3.1 Freies Prisma

Das freie Prisma ist eine Erweiterung des normalen Prismas, bei dem es möglich ist, den Querschnitt frei zu definieren.



**Abb. 4.17** Definition des Querschnitts für ein freies Prisma

**Abb. 4.17** zeigt den Eingabedialog für den Querschnitt eines freien Prismas. Dieser wird anhand eines Vektors aus 2D Punkten beschrieben, und anschließend in z-Richtung unter Verwendung der Höhenangabe extrudiert. Die Punkte des Querschnitts werden dabei aufeinanderfolgend miteinander verknüpft, wobei der letzte und erste Punkt verbunden werden. Für die Definition der Punkte steht eine Listenansicht im linken Bereich zur Verfügung, es ist allerdings auch möglich die Punkte in Form eines Vektors im unteren Bereich direkt anzugeben. Die Listenansicht erlaubt es zusätzlich die aktuellen Punkte in Form einer Textdatei zu speichern und zu laden. Die 2D Ansicht im rechten Bereich zeigt den aktuellen Querschnitt, hier können die Punkte auch interaktiv verschoben werden.

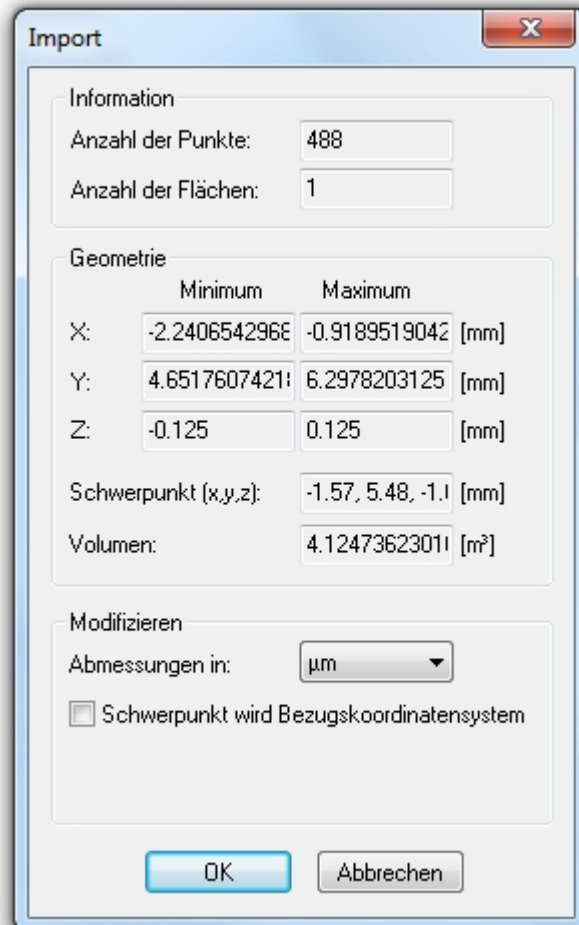
Bei der Angabe der Querschnittspunkte ist zu beachten, dass sie entgegen des Uhrzeigersinns anzugeben sind. Das ist wichtig für die interne Berechnung der Trägheitseigenschaften des Objekts. Falls diese Forderung bewusst oder unbewusst nicht erfüllt wurde wird eine entsprechende Warnung ausgegeben.

#### 4.6.3.2 CAD Import

Mit dem CAD Import Element ist es möglich eine beliebige Geometrie aus einer STL Datei zu laden und in ISOMAG zu verwenden. Das STL Format ist ein low-level CAD-Format, bei dem die Geometrie des Körpers durch ein Dreiecksnetz approximiert wird. Alle marktüblichen CAD-Tools können STL Dateien erzeugen. Volumen

und Trägheiten werden beim Import automatisch aus der Geometrie berechnet, können aber später verändert werden.

Auf der ersten Seite der Eigenschaften des CAD Import Elements kann mit der Auswahl einer STL-Datei der Importvorgang gestartet werden. Es werden sowohl STL-Dateien im Text- als auch im Binärformat unterstützt. Nach dem erfolgreichen Einlesen der STL-Datei erscheint ein Dialog, der Informationen zu den importierten Daten anzeigt.



**Abb. 4.18** Informationen zu einer importierten CAD Datei

Den Informationen kann entnommen werden, wie viele Punkte/Flächen importiert wurden. Außerdem wird über Minimum/Maximum sowie berechnetem Schwerpunkt der Punkte angezeigt, wie diese räumlich verteilt sind. Im unteren Bereich lassen sich die Punkte für die Verwendung in **ISOMAG** modifizieren:

Abmessungen: Erlaubt es die Einheit der importierten Punktpositionen zu definieren. Diese ist in einer STL Datei nicht festgelegt, standardmäßig wird die derzeit in **ISOMAG** eingestellte Einheit verwendet. Wird die Einheit im Auswahldialog geändert dann ändert sich die Abmessung des importierten Körpers, wie an den im Dialog angezeigten Informationen abzulesen ist.

Schwerpunkt zu Bezugskordinatensystem: Der Schwerpunkt der importierten Punkte liegt im Allgemeinen nicht im Ursprung. Aktivieren Sie diese Funktion um alle Punkte derart zu transformieren, dass deren Schwerpunkt im Koordinatensystem des ISOMAG CAD Elements liegt. Diese Funktion ist hilfreich falls die Punkte sehr weit vom Ursprung entfernt liegen. Es kann jedoch vorkommen, dass mehrere zueinander gehörige STL Dateien zu importieren sind. In diesem Fall wird diese Funktion nicht empfohlen, da mit der Transformation der Punkte auch die Lage der verschiedenen STL Körper zueinander verloren geht.

Bei dem Import von CAD Daten ist unbedingt die Ausdehnung und Position der Geometriedaten zu beachten. Importierte Körper mit einer zu großen oder zu kleinen Ausdehnung bzw. sehr großem Abstand vom Koordinatenursprung können mitunter bewirken das die 3D Ansicht nicht korrekt ausgerichtet werden kann, wodurch in den Ansichten keine Inhalte mehr sichtbar sind. Eine leere 3D Ansicht bzw. seltsame Effekte beim automatischen Ausrichten der Ansichtskamera können auf nicht sinnvolle Einstellungen beim Import der CAD Daten zurückzuführen sein. In diesem Fall empfiehlt es sich den Import erneut durchzuführen oder aber die STL Daten, falls möglich, erneut zu generieren, wobei die Position der Körper in die Nähe des Ursprungs zu legen ist.

Bitte beachten Sie auch, das vor allem große CAD Objekte einen erheblichen Einfluss auf Performance und Speicherbedarf von ISOMAG haben können. Die meisten CAD Programme erlauben es die Komplexität der exportierten STL Daten zu reduzieren. Nutzen Sie diese Funktion falls Einschränkungen der Bedienbarkeit von ISOMAG bei Verwendung der CAD Daten auffällig werden.

#### 4.6.4 Isolatoren

Mit diesen Objekten lassen sich sowohl Isolatoren als auch allgemeine Feder-Dämpfer-Elemente, wie beispielsweise Zusatzfedern oder Rohrleitungen, modellieren. Sie werden so erzeugt, wie es bereits ausführlich in Abschnitt 4.5.1 erläutert wurde. Meist sind sie vom gleichen Typ, d. h. sie besitzen identische Parameter. Dann empfiehlt es sich, die Option „Parameterdialog“ zu deaktivieren: Alle Isolatoren können zunächst auf dem Arbeitsblatt abgelegt und anschließend als Gruppe gleichzeitig parametrisiert werden (vgl. Abschnitt 4.5.3.4).

Es gibt drei Arten von Isolatoren. Diese sind farblich unterschiedlich dargestellt:

- Isolatoren, die zwischen Maschine und Umgebung liegen (blau-braun).
- Isolatoren, die zwischen Maschine und Fundament liegen (blau-grau),
- Isolatoren, die zwischen Fundament und Umgebung liegen (grau-braun),

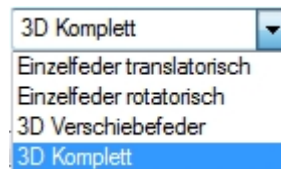
Ändert man diese Zuordnungen - das ist nur sinnvoll und möglich, wenn das Projekt ein Fundament besitzt - verändern sich auch die Farben der Isolatoren entsprechend. Gleichzeitig kann sich die Lage in der Objekt-Hierarchie entsprechend **Abb. 4.3** ändern. Dies in der Baumansicht zu sehen.

#### 4.6.4.1 Anordnung

Gewöhnlich sollen Maschine und Fundament waagrecht stehen. Um das zu erreichen, verschiebt und/oder dreht man die Isolatoren so lange, bis die Achse einer Hauptverschiebesteifigkeit (grüner Pfeil) mit der z-Achse des Schwerpunktkoordinatensystems (blauer Pfeil) zusammenfällt. Alternativ - und insbesondere dann, wenn zusätzliche statische Lasten zu berücksichtigen sind - kann man sich die statischen Verformungen (Menü „Ergebnisse“) anzeigen lassen und die Lage der Isolatoren manipulieren, bis die Neigungen Null sind. Es empfiehlt sich, zunächst die Maschine auszurichten. Hierzu betrachtet man den Maschinenschwerpunkt sowie den Schwerpunkt der Isolatoren, die die Maschine lagern (Federschwerpunkt Maschine). Zur Ausrichtung werden die Isolatoren der Maschine manipuliert. Um Maschine und Fundament auszurichten, betrachtet man deren Gesamtschwerpunkt sowie den Schwerpunkt der das Fundament lagernden Federn (Federschwerpunkt Maschine). Zur Ausrichtung werden die Federn am Fundament manipuliert.

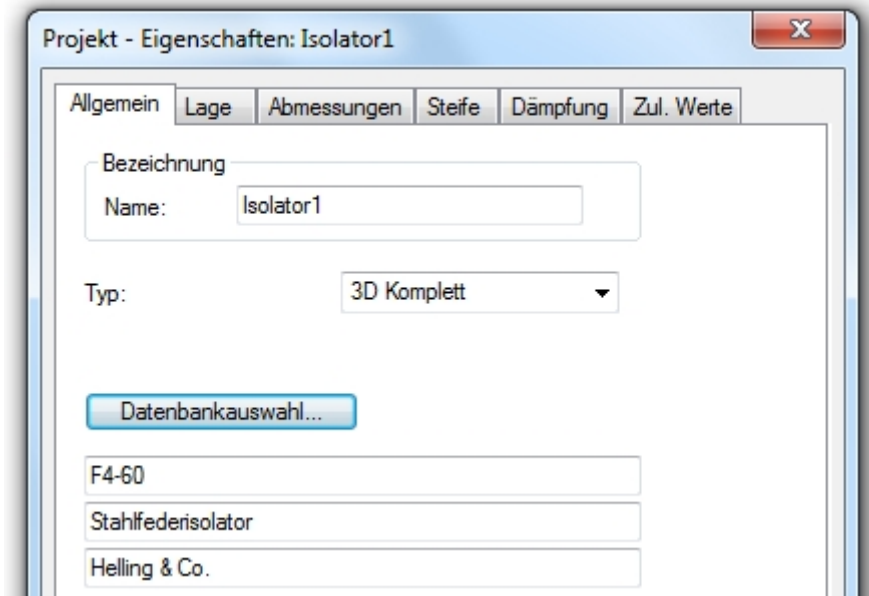
Isolatoren verfügen über einen Bezugspunkt (vgl. Abschnitt 0). Dieser Bezugspunkt stellt zugleich die Verbindungsstelle des Federelementes mit dem zu isolierenden starren Körper dar (Maschine oder Fundament; vgl. Objekthierarchie **Abb. 4.3**). Die dem Bezugspunkt gegenüber liegende Seite des Isolators ist dagegen typabhängig mit dem Fundament oder der starren bzw. elastischen Umgebung verbunden. Die Federsteifigkeit wirkt tatsächlich nicht am Bezugspunkt, sondern an der geometrischen Mitte des Isolators. Dies entspricht der praktischen Realität, ist aber für theoretische Betrachtungen zu beachten.

#### 4.6.4.2 Allgemeiner Parameterdialog



**Abb. 4.19** Listbox zur Auswahl des Isolatorentyps

Hier kann man wählen zwischen "Feder translatorisch", "Feder rotatorisch", "3D-Verschiebefeder" und "3D Komplett". Damit wird festgelegt, in welche Koordinatenrichtungen (bezüglich Elementkoordinaten) das Element wirkt. Für diese Koordinatenrichtungen können dann Werte für Steifigkeit und Dämpfung sowie Grenzwerte eingegeben werden (Abschnitte 4.6.4.3 bis 4.6.4.5). Mit der Schaltfläche "Datenbankauswahl" können Isolatoren aus der Datenbank ausgewählt werden. Näheres dazu im Abschnitt 5.1.



**Abb. 4.20** Beispiel für einen aus der Datenbank ausgewählten Isolator

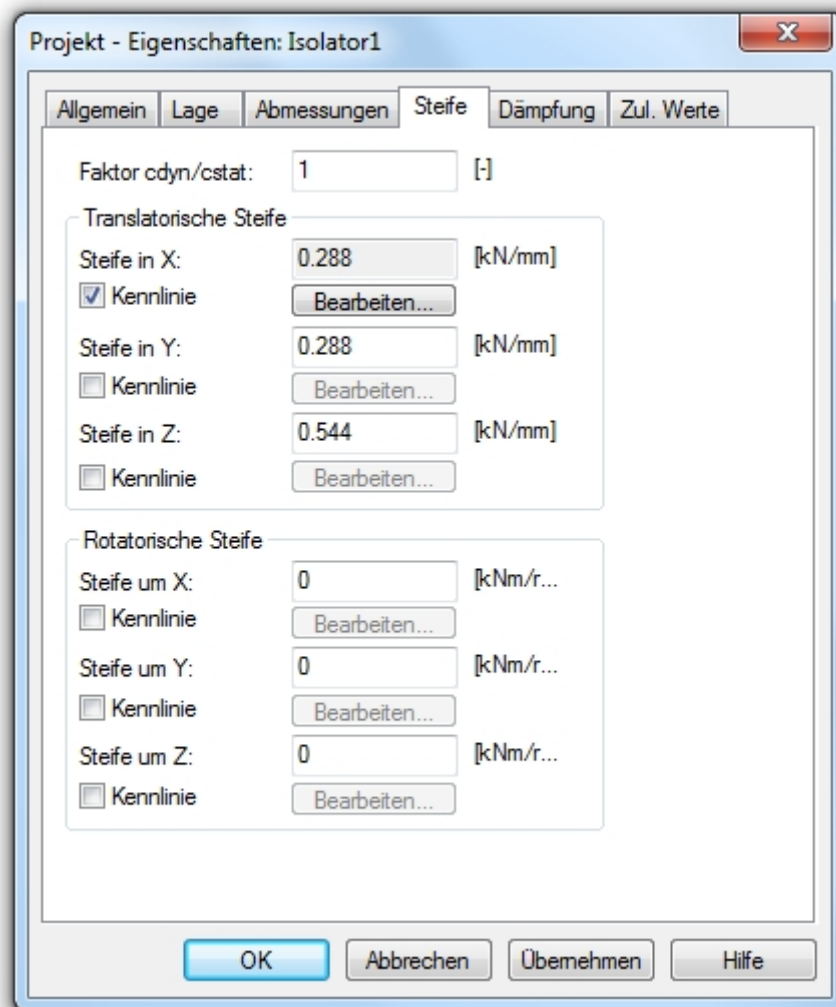
Hat man aus der Datenbank einen Typ ausgewählt, wird dessen Artikelnummer, Typ und Hersteller in der Registerkarte „Allgemein“ angezeigt. Alle Parameter werden übernommen und in den entsprechenden Registerkarten aktualisiert. Überschreibt man danach diese Werte, wird die Datenbank-Verknüpfung gelöst. Die restlichen Werte bleiben erhalten.

#### 4.6.4.3 Parameterdialog Steife

Es hängt von dem gewählten Isolator ab, welche Parameter in diesem Dialog einzugeben sind (**Abb. 4.19**). Arbeitet man z. B. mit einer translatorischen Einzelfeder, ist nur ein Wert für die Steife in z-Richtung einzugeben. Wählt man dagegen "3D Komplett", dann sind alle im **Abb. 4.21** gezeigten Parameter einzugeben. Aktiviert man die Option "Kennlinie" und klickt auf "Bearbeiten", öffnet sich der Kennlinien-Dialog, der ausführlich im Abschnitt **5.2** beschrieben wird.

Über den "Faktor  $c_{dyn}/c_{stat}$ " lässt sich die "Trägheit" hochelastischer Werkstoffe näherungsweise berücksichtigen. Aufgrund des Kriechverhaltens dieser Werkstoffe weisen sie bei schwingenden Beanspruchungen bzw. bei Beanspruchungen mit hohen Geschwindigkeiten eine scheinbar höhere Steifigkeit auf als im statischen Fall, für den die Werte im Allgemeinen angegeben werden. Die eingegebenen Steifigkeiten werden in **ISOMAG** für die dynamische Rechnung mit diesem Faktor multipliziert (vgl. Abschnitt **3.1.4.6**). Hersteller geben ihn für Gummielemente mit 1 bis 1.5 an. Für Stahlfedern ist er gleich 1.

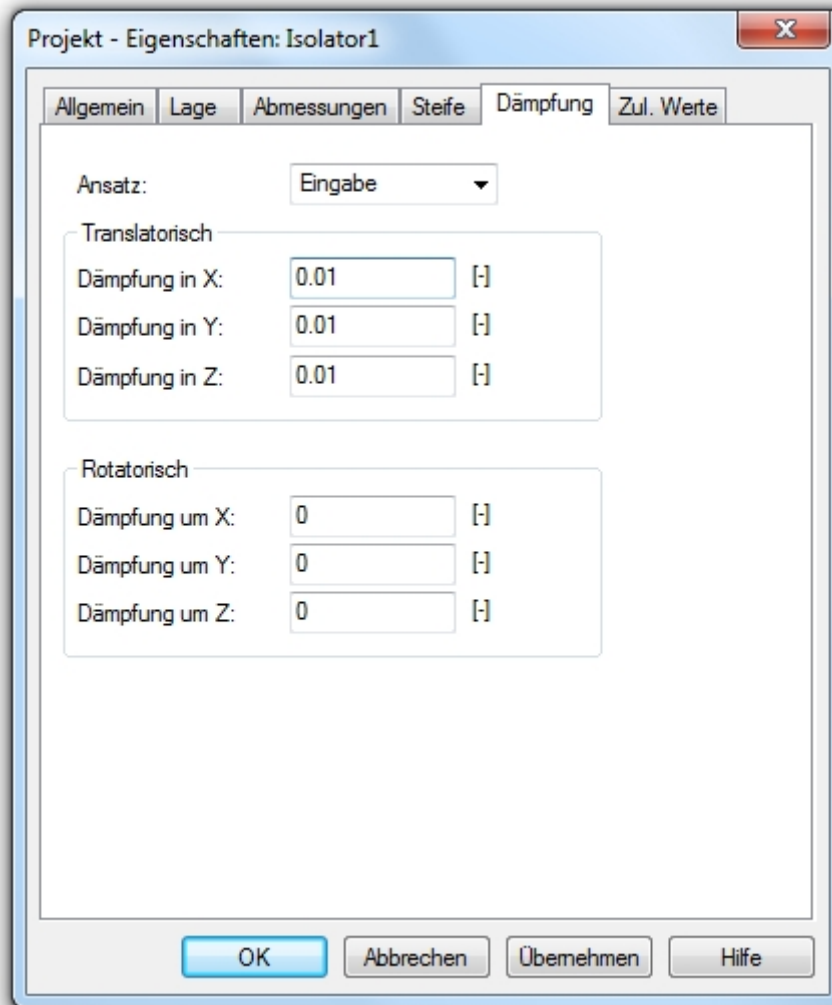
Hinweis: Soll der Faktor bei der Suche in der Datenbank berücksichtigt werden, edittiert man das Suchkriterium entsprechend und ändert die Bedingung  $Cz \leq 0.04904$  beispielsweise in  $Cz \leq 0.04904/1.5$ , falls der Faktor 1.5 ist.



**Abb. 4.21** Parameterdialog zur Ermittlung der Steife von Isolatoren

#### 4.6.4.4 Parameterdialog zur Beschreibung der Dämpfung

Im Programm kann schwache Dämpfung ( $D < 0.15$ ) berücksichtigt werden. Das ist für die Werkstoffdämpfung der Isolatoren ausreichend. **Abb. 4.22** zeigt den Dialog zur Eingabe der Dämpfung. Es lässt sich bestimmen, ob mit oder ohne Ansatz für die Dämpfung gearbeitet wird. Bei "Ansatz für Stahl" verwendet **ISOMAG** ein Lehr'sches Dämpfungsmaß  $D$  von 0.005. Bei "Ansatz für Gummi" ist  $D = 0.05$ . Diese Dämpfung wirkt in alle Koordinatenrichtungen, die der Isolator entsprechend seines Typs besitzt (**Abb. 4.19**): für „3D Komplett“ z. B. in alle sechs Richtungen, für die translatorische Einzelfeder dagegen nur in z-Richtung. Wird "Eingabe" gewählt, kann für jede Koordinatenrichtung ein Wert angegeben werden.



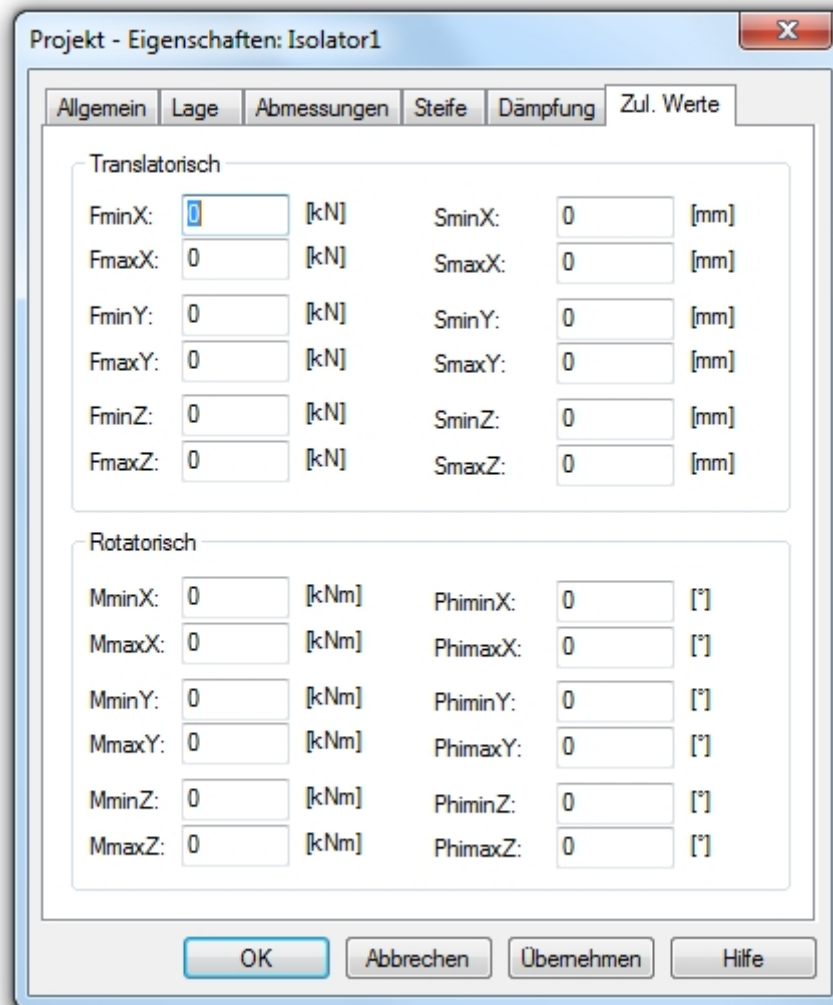
**Abb. 4.22** Parameterdialog zur Eingabe der Dämpfung am Beispiel des Isolatoren-Typs "3D Komplett"

#### 4.6.4.5 Parameterdialog zur Eingabe zulässiger Werte

Viele Hersteller geben Grenzwerte für die statischen Belastungen der Isolatoren an. Diese Werte können auf der in **Abb. 4.23** dargestellten Dialogseite eingegeben werden. Welche Editfelder zur Eingabe bereitgestellt werden, hängt wieder vom gewählten Isolatoren-Typ ab (**Abb. 4.19**). Es können sowohl für Kräfte als auch für Verformungen zulässige Werte angegeben werden. Positive Werte gelten dabei für Belastungen auf Druck, negative für Zug. Die Maximalwerte sollten größer als die Minimalwerte sein. Sind beide Werte gleich Null, geht das Programm davon aus, dass kein Grenzwert existiert.

Wenn einer der zulässigen Werte überschritten wird, erscheint ein entsprechender Hinweis am Schluss der Rechnung.



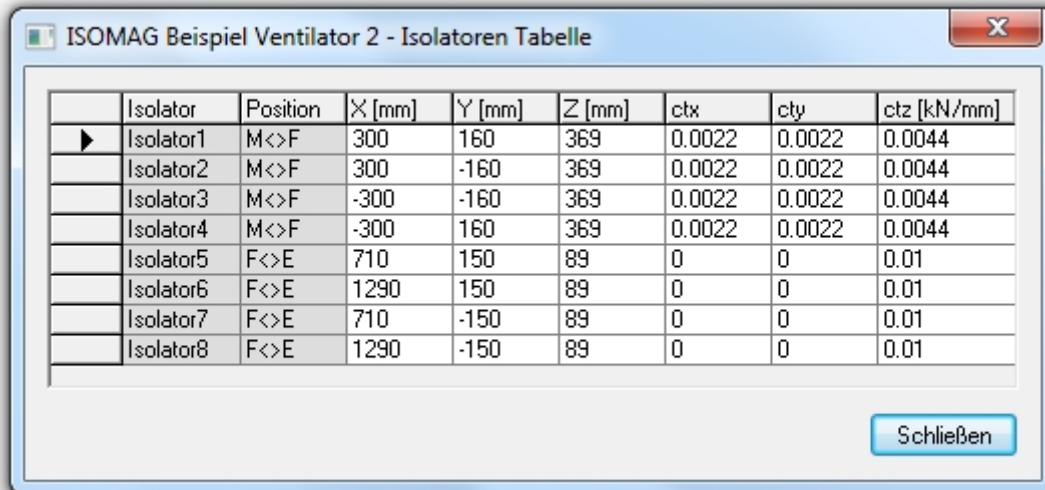


**Abb. 4.23** Dialog zur Eingabe von Grenzwerten am Beispiel des Isolatoren-Typs "3D Komplett"

#### 4.6.4.6 Isolatorentabelle

Über den Menüpunkt "Bearbeiten/Isolatoren Tabelle..." wird eine Tabelle zur Anzeige gebracht, die alle im aktuellen Modell verwendeten Isolatoren mit ihren wesentlichen Parametern auflistet. Die Isolatoren sind sortiert nach Ihrer Position im Modell, d.h. ob sie zwischen Maschine und Umgebung, Maschine und Fundament oder Fundament und Umgebung wirken. Die Lage und Steifigkeiten (falls nicht durch Kennlinie definiert) der Isolatoren lassen sich hier direkt ändern, jede Änderung bewirkt eine Neuberechnung des Modells.

Während die Übersichtstabelle der Isolatoren aktiv ist, sind alle anderen Programmfunktionen deaktiviert. Die 3D-Ansichten und alle Ergebnisfenster werden dennoch aktualisiert, um die Änderungen in der Tabelle nachvollziehen zu können. Um die Auswirkungen der Änderungen auf bestimmte Ergebnisse zu überprüfen (beispielsweise den Federschwerpunkt), sind diese Anzeigen zu öffnen bevor die Isolatorentabelle geöffnet wird.



	Isolator	Position	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	ctx	cty	ctz [kN/mm]
▶	Isolator1	M<>F	300	160	369	0.0022	0.0022	0.0044
	Isolator2	M<>F	300	-160	369	0.0022	0.0022	0.0044
	Isolator3	M<>F	-300	-160	369	0.0022	0.0022	0.0044
	Isolator4	M<>F	-300	160	369	0.0022	0.0022	0.0044
	Isolator5	F<>E	710	150	89	0	0	0.01
	Isolator6	F<>E	1290	150	89	0	0	0.01
	Isolator7	F<>E	710	-150	89	0	0	0.01
	Isolator8	F<>E	1290	-150	89	0	0	0.01

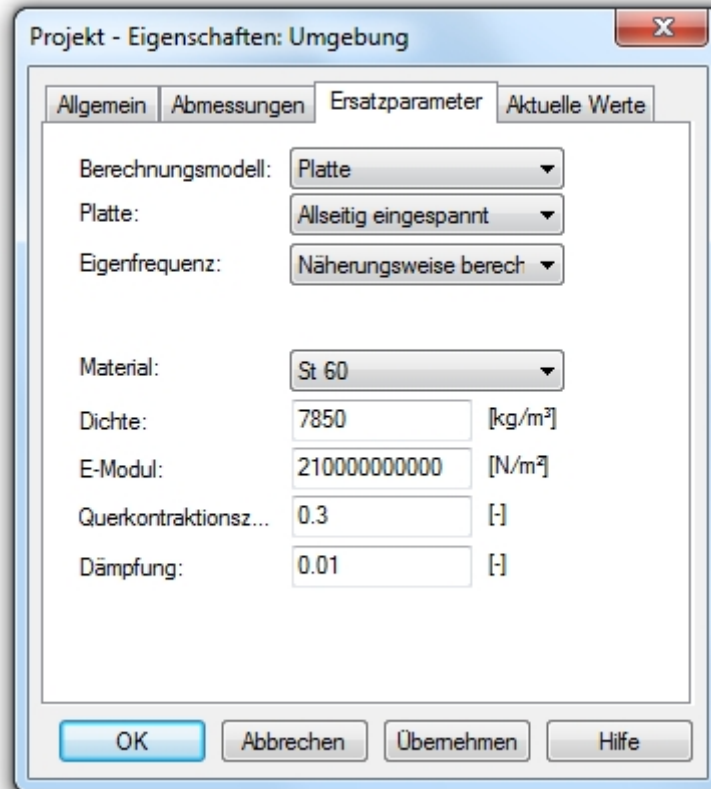
**Abb. 4.24** Tabelle mit Position und Steifigkeiten der Isolatoren eines Modells

Mit einem Rechtsklick auf die Spaltenüberschriften kann die Anzeige der Steifigkeiten sowie der translatorischen Belastungen und Verformungen ein- bzw. ausgeschaltet werden.

#### 4.6.5 Umgebung

Die Umgebung - im Beispiel **Abb. 4.25** als Bodenplatte bezeichnet - stellt in den meisten Fällen den Fußboden dar, auf der Maschine, Fundament etc. stehen. Für die Berechnung kann zwischen den Modellen "Starr", "Balken" und "Platte" unterschieden werden.





Die Dicke der Umgebung (Registerkarte "Abmessungen") geht nur in die Berechnung ein, wenn es sich um eine elastische Aufstellung handelt, wenn entweder das Berechnungsmodell "Platte" oder "Balken" gewählt wurde und wenn die Eigenfrequenz näherungsweise berechnet wird.



**Abb. 4.25** Dialog zur Beschreibung der Umgebung

Aus den Parametern berechnet **ISOMAG** nach dem gewählten Ansatz die Ersatzmasse und Ersatzsteifigkeit (vgl. Abschnitt 2.6). Diese Werte werden auf der Registerkarte "Aktuelle Werte" angezeigt.

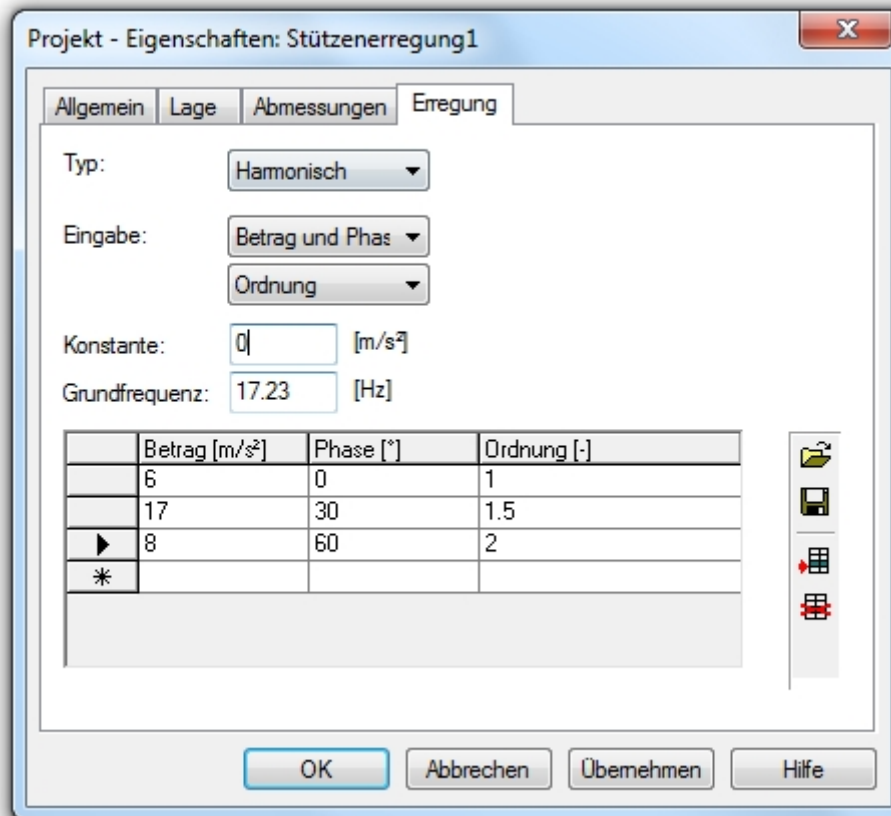
#### 4.6.6 Erregungen

Hinter den Schaltflächen , ,  und  der Objektleiste verbergen sich die verschiedenen Formen der Erregung. **ISOMAG** berücksichtigt Kraft-, Momenten-, Unwucht- und Stützerregung. Sie können konstant, harmonisch und impulsförmig sein und lassen sich wie alle Objekte auf dem Arbeitsblatt platzieren (vgl. Abschnitt 4.5.1). Der Bezugspunkt der Kräfte und Momente ist ihr Angriffspunkt. Im Modell wird er durch die Pfeilspitze symbolisiert.

Bei der Stützerregung kann vorgegeben werden, ob es sich um eine Weg-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvorgabe handelt. Die Vorgabe erfolgt auf der ersten Seite des Parameterdialoges der Stützerregung. Die physikalische Bedeutung der Parameter auf der Dialogseite "Erregung" wird entsprechend umgeschaltet. Ist Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvorgabe gewählt, wird die Erregung mittels einmaliger bzw. zweimaliger Integration im Frequenzbereich in eine Wegvorgabe umgerechnet. Bitte berücksichtigen sie diesen Umstand bei der Vorgabe von Beschleunigungen. Oftmals werden Beschleunigungsverläufe so definiert, dass nach dem gewollten Ende der Anregung noch eine Restgeschwindigkeit verbleibt. Das führt zu unerwarteten Ergebnissen. Kontrollieren Sie deshalb bei einer

Beschleunigungsvorgabe die resultierenden Zeitverläufe der Geschwindigkeiten und Auslenkungen. Diese können über das Kontextmenü der Stützerregung zur Anzeige gebracht werden.

### Parameterdialog zur Beschreibung der Erregung



**Abb. 4.26** Dialog zur Beschreibung von Kraft-, Momenten- und Stützerregungen

Als Kraft-, Momenten- und Stützerregungen können harmonische, Impuls- oder nutzerdefinierte Verläufe vorgegeben werden.

Harmonisch: Zur Definition einer harmonischen Erregung können Betrag und Phase oder alternativ die Koeffizienten der Kosinus- und Sinuskomponenten angegeben werden. Beide Eingabemöglichkeiten beschreiben den gleichen Sachverhalt und lassen sich ineinander umrechnen. Analog kann man Ordnung und Grundfrequenz oder die jeweilige Frequenz angeben.

Impuls: Als Impulsformen können Rechteck, Dreieck und Halbsinus ausgewählt werden. Sollen mehrere Impulse mit abklingender Amplitude hintereinander erzeugt werden, können dafür mehrere Erregungsobjekte an die gleiche Position gesetzt und entsprechend parametrisiert werden. Eine andere Möglichkeit besteht in der Nutzung einer nutzerdefinierten Erregung, wie das weiter unten beschrieben ist.

Mit entsprechender Parametrierung kann mit dem Halbsinusimpuls auch eine sinusförmige Erregung nachgebildet werden. Dazu sollten Sie allerdings besser keine Impulserregung nutzen, sondern eine harmonische. Die Impulse werden zur Berechnung mittels FFT in den Frequenzbereich überführt. Harmonische Erregungen sind bereits im Frequenzbereich definiert. Eine Transformation ist hier nicht erforderlich. Die Genauigkeit der Rechnung steigt und die benötigte Rechenzeit sinkt.

Nutzerdefiniert: Über nutzerdefinierbare Erregungen können beliebige Kurvenformen als Erregung nachgebildet werden. Mittels "Bearbeiten..." öffnen Sie den Dialog zur Kennlinienbearbeitung. Dort können Sie Werte von Hand eingeben, graphisch interaktiv verändern oder auch aus Dateien einlesen. Zu beachten ist, dass die eingegebenen Verläufe periodisch fortgesetzt werden, da vom Rechenverfahren Periodizität der Erregungen unterstellt wird. Darum sollten ganze Perioden oder kurze Impulse (vgl. Abschnitt 4.2.1.3) beschrieben werden.

Während der Berechnung wird der Verlauf mittels FFT in den Frequenzbereich überführt. Dabei wird er mit der Rechenschrittweite abgetastet. Falls sich innerhalb der Rechenschrittweite der Verlauf zu stark ändert, kann er nicht korrekt wiedergegeben werden. Die Schrittweite, mit der die Daten vorliegen, sollte also größer als die Rechenschrittweite sein. In solch einem Fall wird während der Berechnung eine Warnung ausgegeben. Diese Warnung können Sie ignorieren, wenn sich der Verlauf innerhalb der Rechenschrittweite nur langsam ändert

#### 4.6.6.1 Erdbebenanregung

Erregungen durch Erdbeben entsprechen einer Stützerregung. Die betragsmäßig höchsten Komponenten zeigen dabei in horizontale (x oder y) Richtung. Als Vertikalbeschleunigung wird in [30] empfohlen, mit 2/3 der Horizontalbeschleunigung zu rechnen. Die Erregung steht zumeist als gemessener Beschleunigungsverlauf zur Verfügung. Solche Daten können beispielsweise von der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik oder über die European Strong Motion Database (<http://www.isesd.hi.is/>) bezogen werden.

Zur Modellierung einer Erdbebenanregung in ISOMAG benutzen Sie die Stützerregung. Diese stellen Sie auf "Beschleunigung" ein. Um die 2/3 Aufteilung zwischen horizontal- und Vertikalbeschleunigung zu erreichen, müssen Sie die Stützerregung -33.7 ° um die y-Achse drehen. Auf der Dialogseite "Erregung" wählen Sie unter "Art" "Nutzerdefiniert" aus. Über "Bearbeiten..." öffnen Sie den Kennliniendialog. Dort können Sie ihre Daten mittels "Datei öffnen" Schaltfläche aus einer vorliegenden Datei importieren. Ein Assistent leitet Sie durch diesen Vorgang.

Da als Erregung der Betrag eingegeben wird, die Beschleunigungsverläufe aber in horizontaler Richtung vorliegen, müssen Sie diesen noch mit dem Faktor

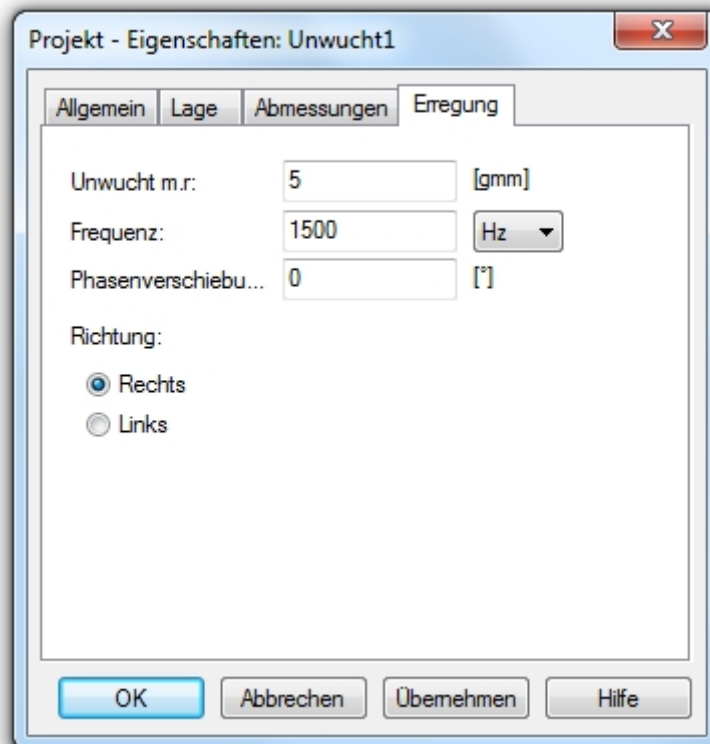
$$\cos\left(\arctan\left(\frac{2}{3}\right)\right) = 1.2 \quad (4.2)$$

multiplizieren. Das können Sie im Vorfeld des Imports an den vorliegenden Rohdaten beispielsweise in Microsoft Excel oder nach dem Import im Kennliniendialog tun.

Beachten Sie die Ausführungen im Abschnitt **4.2.1.3** zur Berücksichtigung von Impulserregungen bei der Berechnung. Stellen Sie sicher, dass Ihrem System nach dem "Ende" des Erdbebens genügend Zeit zur "Beruhigung" verbleibt. Setzen Sie dazu die Endzeit (siehe Abschnitt **4.7.1**) der Berechnung entsprechend hoch und erweitern Sie den Erregungsverlauf bis zur Endzeit mit dem Wert Null.

#### 4.6.6.2 Unwuchterregung

Der Parameterdialog für die Unwuchterregung ist in **Abb. 4.27** dargestellt. Er ermöglicht die Eingabe des Unwuchtbetrages, d. h. die Eingabe des Produktes aus Masse und Exzentrizität ( $m \cdot r$ ) sowie von Frequenz und Phasenlage. Außerdem ist Rechts- oder Linkslauf einstellbar.




**Abb. 4.27** Parameterdialog zur Beschreibung einer Unwuchterregung

#### 4.6.7 Punkte

Punkte lassen sich wie alle Objekte auf dem Arbeitsblatt platzieren (vgl. Abschnitt **4.5.1**). Man kann beliebig viele Punkte an frei wählbaren Stellen in das Modell einfügen. **ISOMAG** berechnet für die Punkte statische und dynamische Ergebnisgrößen. So können Sie damit für beliebige Stellen im Modell die statischen Verformungen, Bewegungsgrößen über der Zeit oder Verformungen über der Frequenz darstellen (vgl. Abschnitt **4.8**).

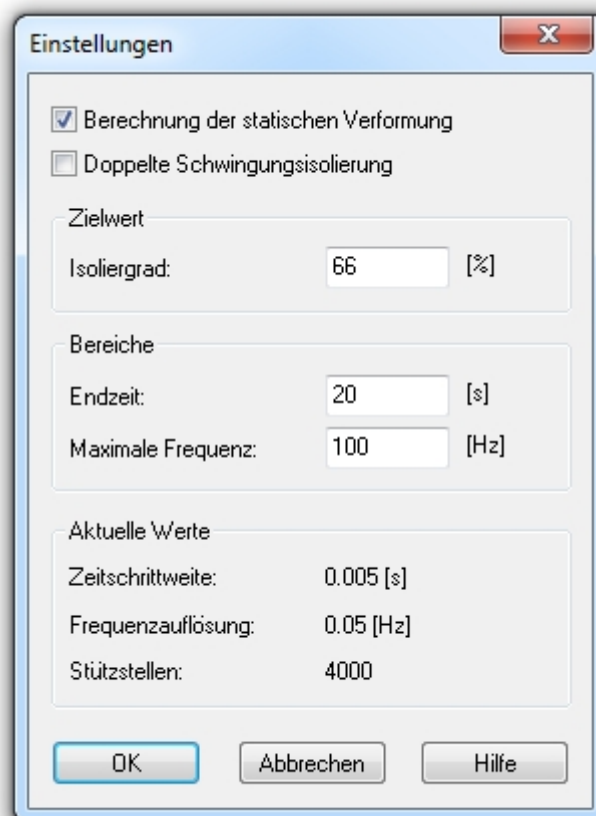
## 4.7 Berechnung

Standardmäßig wird die Berechnung aller Ergebnisse nach jeder Veränderung am Modell gestartet. Kann die Berechnung nicht erfolgreich abgeschlossen werden, erscheint eine entsprechende Mitteilung. In den Titelleisten aller Ergebnisfenster wird dann "nicht aktuell" angezeigt. Der Punkt in der Statuszeile bleibt rot. Die angezeigten Ergebnisse sind die des letzten erfolgreichen Berechnungsdurchlaufes.


Die automatische Berechnung kann über  in der Symbolleiste bzw. das Menü "Bearbeiten" abgeschaltet werden. Das ist insbesondere dann zu empfehlen, wenn sich das Modell noch in der Entstehungsphase befindet und die Unterbrechungen ein zügiges Arbeiten verhindern. Eine Berechnung wird dann nur ausgeführt, wenn ein neues Ergebnis angezeigt oder die Animation gestartet wird.

### 4.7.1 Einstellungen

Über den Menüpunkt "Berechnung/Einstellungen.." können die Parameter des Berechnungsverfahrens verändert werden.



**Abb. 4.28** Dialog Berechnung – Einstellungen

Die Berechnung und Animation der **statischen Verformung** kann mit der entsprechenden Checkbox und der Schaltfläche  in der Symbolleiste unterdrückt werden.

Dies ist z.B. für Systeme mit Luftfedern und automatischer Niveauregulierung von Interesse.

Die Checkbox **Doppelte Schwingungsisolierung** kann eingeschaltet werden, wenn ein Zwei-Massensystem behandelt werden soll. Der Button **Zwischenfundament** in der Objekteiste und der Assistent für die Doppelte Schwingungsisolierung wird dann aktiviert. Haben Sie einmal ein Zwischenfundament erstellt, kann die Checkbox nicht mehr ausgeschaltet werden. Wenn Sie das komplette Zwischenfundament löschen, wird automatisch die Doppelte Schwingungsisolierung ausgeschaltet.

Der hier im Dialog eingegebene Isoliergrad hat keinen Einfluss auf die Berechnung. Er wird lediglich als Hilfslinie in die Vergrößerungsfunktionen eingeblendet, um die Beurteilung der Ergebnisse zu erleichtern (siehe auch Abschnitt 4.8.2.2 "Darstellung des erreichten Isolationsgrades").

Über den Parameter **Endzeit** ( $T$ ) wird die Länge der Ergebnisgrößen im Zeitbereich bestimmt. Dieser Wert bestimmt gleichzeitig auch Auflösung bzw. den Abstand der Punkte  $\Delta f$  im Frequenzbereich. Es gilt:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

Die Auflösung im Frequenzbereich kann also durch eine Erhöhung der Endzeit vergrößert werden.

Der Parameter **Maximale Frequenz** ( $f_{\max}$ ) stellt den Endwert der berechneten Frequenzgänge und Vergrößerungsfunktionen dar. Für diesen Wert und den Abstand der Punkte  $\Delta t$  in den Zeitverläufen gilt folgender Zusammenhang:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{\max}} \quad (4.4)$$

Mit dieser Schrittweite werden die Erregungen im Zeitbereich (Impuls und nutzerdefiniert) abgetastet. Hier gilt: Je kleiner die maximale Frequenz, umso größer ist die Schrittweite. Sie sollten vor der Definition der Erregungen prüfen, ob diese mit den gewählten Einstellungen auch hinreichend genau abgetastet werden. ISOMAG gibt während der Berechnung eine Warnung aus, wenn bei nutzerdefinierten Erregungen der Stützstellenabstand kleiner als die Rechenschrittweite ist.

Bei einer Erweiterung des Frequenzbereiches über 100 Hz hinaus muss damit gerechnet werden, dass das Rechenmodell der starren Maschine nicht mehr gültig ist. Dieses setzt voraus, dass die Eigenfrequenzen im betrachteten Frequenzbereich nur von den Elastizitäten der Isolatoren bestimmt werden. Maschine und Fundament werden idealisiert als starr betrachtet. Bei höheren Frequenzen gilt das unter Umständen nicht mehr. Die Elastizitäten der Maschine können dann nicht mehr vernachlässigt werden. Körperschalleinflüsse müssen berücksichtigt werden. ISOMAG gibt deshalb beim Verlassen des Einstellungsdialoges eine Warnung aus.



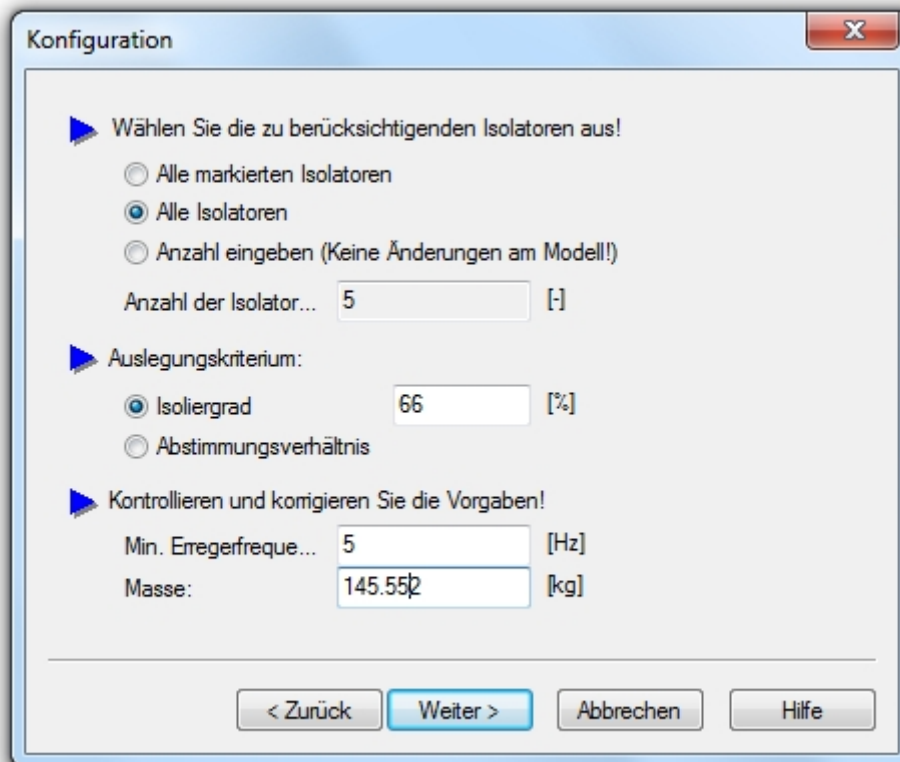
Die aktuellen Werte für Zeitschrittweite, Frequenzauflösung und Stützstellenzahl für die Berechnung werden im unteren Bereich des Dialoges angezeigt. Beachten Sie, dass mit steigender Stützstellenzahl Rechenzeit und Speicherplatzbedarf ansteigen.

## 4.7.2 Auslegungsrechnung

Die Auslegung unterstützt Sie bei der Auswahl geeigneter Isolatoren aus der Datenbank (vgl. Abschnitt 5.1), um einen bestimmten Isolationsgrad zu erreichen. Die Auslegungsrechnung erfolgt innerhalb der **Assistenten für einfache** bzw. **doppelte Schwingungsisolierung** (Menü "Berechnung/Assistenten...").

### 4.7.2.1 Assistent für einfache Schwingungsisolierung

Der Assistent ist so gestaltet, dass er auch ohne Modell benutzbar ist. Daten, die sonst aus dem Modell extrahiert werden (Anzahl der Isolatoren, minimale Erregerfrequenz, Masse), sind dann von Hand einzugeben.



**Abb. 4.29** Assistent für einfache Schwingungsisolierung

Ausgelegt wird am Schwinger mit einem Freiheitsgrad. Die Anwendung der Gleichungen des Schwingers mit einem Freiheitsgrad setzt voraus, dass die Koordinaten des Systems entkoppelt sind, was im Allgemeinen nicht erfüllt ist. In diesem Fall liefert die Auslegung Werte, die der Vorauswahl von Aufstellelementen dienen.

In bestimmten Fällen kann man die Gleichung für den Einmassenschwinger auf verschiedene Freiheitsgrade anwenden und somit die Aufstellelemente für verschiedene

Schwingformen separat auslegen (vgl. Abschnitt **3.1.12.1**). In jedem Fall lässt sich anhand der Eigenfrequenzen, des erreichten Isolationsgrades (vgl. **Abb. 4.40**) oder der Kräfte auf den Boden endgültig feststellen, wie gut die gewählten Aufstellelemente das System isolieren.

In der Praxis wird häufig für den in z-Richtung schwingenden Einmassenschwinger ausgelegt. Deshalb werden vom Programm die Voreinstellungen für diesen Schwinger gewählt.

Wie aus **Abb. 4.29** ersichtlich, sind im Assistenten für einfache Schwingungsisolierung Angaben zum gewünschten Abstimmungsverhältnis bzw. zum gewünschten Isolationsgrad zu machen (Radioknopf entsprechend setzen). Wurden bereits Erregungen im Modell beschrieben, steht die kleinste Frequenz aller Erregungen im Editfeld "Minimale Erregerfrequenz". Die voreingestellte Masse ist gleich der Gesamtmasse des Systems. Die Anzahl der Isolatoren entspricht der Zahl der markierten Elemente im Modell. Ist nichts markiert, werden standardmäßig alle Isolatoren einbezogen. Bei Bedarf können die Werte überschrieben werden.

Ein Klick auf "Weiter" berechnet die erforderliche dynamische Steife und die Belastung der Isolatoren unter der Annahme, dass sich das Gewicht gleichmäßig auf sie verteilt. Die verwendeten Formeln finden Sie im Abschnitt **3.1.12.1**.

Mit den Ergebnissen der Auslegungsrechnung werden nun aus der Datenbank Isolatoren ausgewählt, deren Steife in z-Richtung kleiner als die erforderliche Steife und deren maximale Kraft in z-Richtung größer als die maximale Belastung ist. Die Suchkriterien können nach dem Betätigen von "Suchen>>" verändert werden. Damit ist es zum Beispiel möglich, nur Isolatoren bestimmter Hersteller zu berücksichtigen. Näheres dazu im Abschnitt **5.1**. Der gewählte Typ wird beim Beenden der Datenbankauswahl mit "OK" in den Assistenten übernommen und beim Beenden des Assistenten den entsprechenden Isolatoren zugewiesen.

#### 4.7.2.2 Assistent für doppelte Schwingungsisolierung

Wird dieser Assistent gestartet, **wenn noch kein Zwischenfundament existiert**, wird automatisch ein Zwischenfundament generiert. Natürlich müssen Sie unter "Berechnung/Eigenschaften" die "Doppelte Schwingungsisolierung" aktivieren, bevor Sie den Assistenten starten können.

**Konfiguration**

▶ Wählen Sie, wie die Isolatoren zwischen Fundament und Umgebung erzeugt werden sollen!

Gleiche Anzahl wie Isolatoren zwischen Maschine und Fundament

Vier Isolatoren an den Ecken des Fundamentes.

Anzahl eingeben (Keine Änderungen am Modell!)

Anzahl der Isolatoren:  [-]

▶ Legen Sie die Auslegungskriterien fest!

Isoliergrad:  [%]

Min. Erregerfrequenz:  [Hz]

▶ Als Fundamentdicke wird Ihnen ein Viertel des Maximums aus Länge und Breite vorgeschlagen.  
Sie können diesen Wert auch selbst angeben!

Länge in Z:  [dm]

▶ Wählen Sie das Material für das zu erzeugende Fundament.

Material:  ▼

Dichte:  [kg/m<sup>3</sup>]

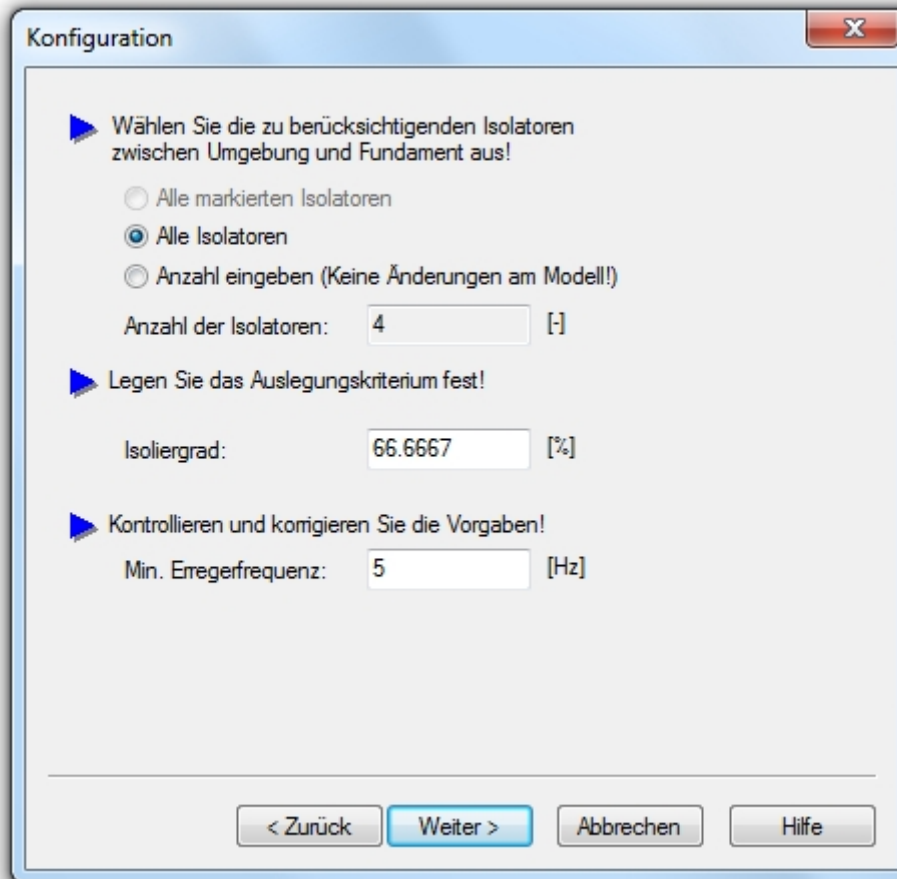
**Abb. 4.30** Assistent für doppelte Schwingungsisolierung bei noch nicht existierendem Fundament

Dabei werden von **ISOMAG** folgende Aktionen ausgeführt:

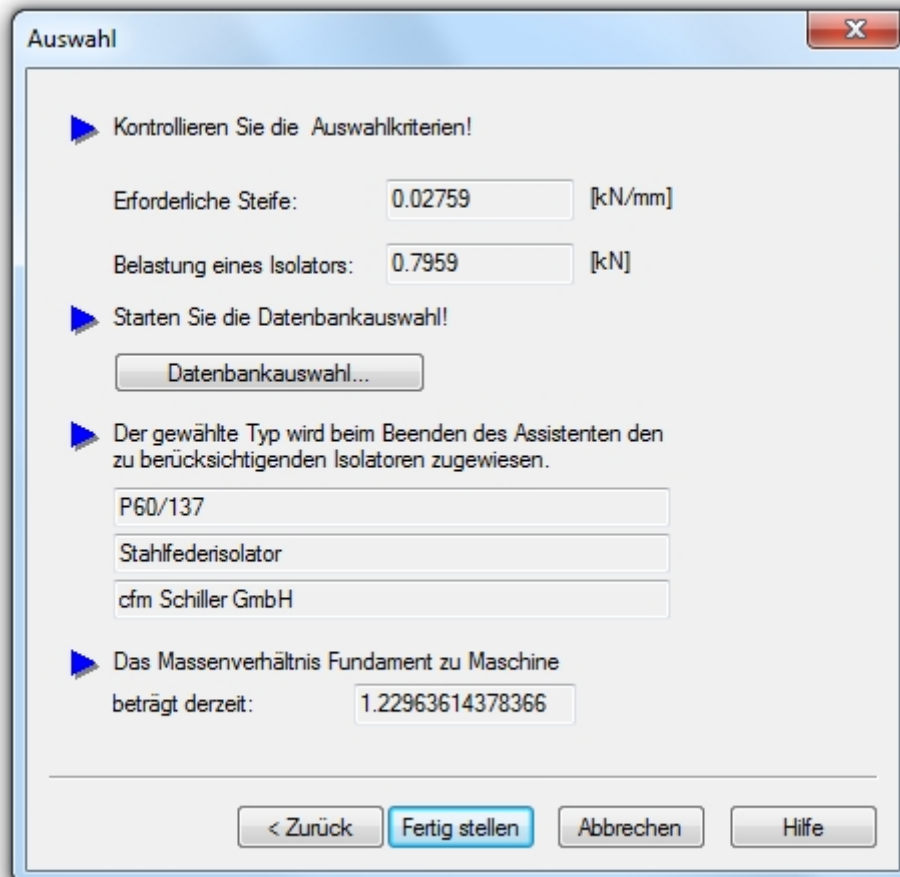
- Die Isolatoren zwischen Maschine und Umgebung wirken von jetzt an zwischen Maschine und Fundament.
- Ein Fundament Körper wird erstellt, der genau unter die Maschine passt.
- Vier Isolatoren (oder die gleiche Anzahl wie unter der Maschine) des bei der Datenbankauswahl gewählten Typs werden zwischen Fundament und Umgebung angelegt. Sie befinden sich an den Ecken des Fundamentkörpers oder unter den Maschinen-Isolatoren.
- Ausrichten von Maschine und Fundament, so dass eine sinnvolle Anordnung entsteht.

Beachten Sie, dass zur Reduktion des Isolationsgrades ein möglichst schweres Fundament nötig ist. Die Fundamentmasse sollte mindestens das Fünffache der Maschinenmasse betragen.

**Wenn schon ein Fundament existiert**, wird ein anderer Assistent gestartet:



**Abb. 4.31** Assistent für doppelte Schwingungsisolierung bei schon existierendem Fundament (1)



**Abb. 4.32** Assistent für doppelte Schwingungsisolierung bei schon existierendem Fundament (2)

Falls der gewünschte Isolationsgrad nicht erreicht werden kann, erscheint auf der in **Abb. 4.32** dargestellten Dialogseite ein entsprechender Hinweis. Eine Datenbankauswahl ist dennoch möglich. Dabei wird das Auswahlkriterium "Erforderliche Steife" nicht berücksichtigt.

## 4.8 Ergebnisse

**ISOMAG** liefert statische und dynamische Ergebnisse. Die statischen Ergebnisse werden in Ergebnisdialogen, die dynamischen in Ergebnisfenstern (vgl. Abschnitt 5.3) angezeigt. Während der Bearbeitung können beliebig viele Ergebnisdialoge und -fenster geöffnet sein. Die Fenster werden nach jeder erfolgreichen Berechnung aktualisiert.

Folgende statische Ergebnisse liefert das Programm:

- Hauptträgheiten,
- Hauptsteifigkeiten,
- statische Belastungen der Isolatoren,

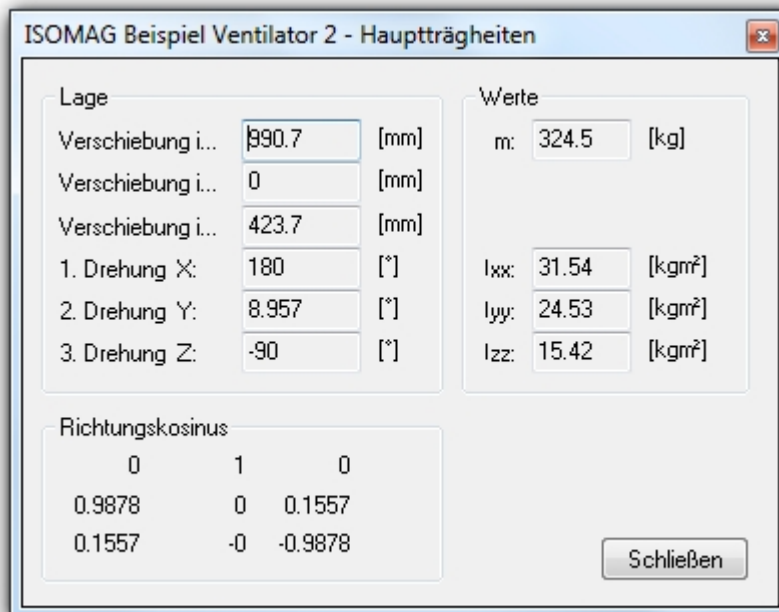
- statische Verformungen (an Punkten, Schwerpunkten und Isolatoren).
- Eigenfrequenzen und Eigenwerte.

Als dynamische Ergebnisverläufe stehen der Frequenzgang und die Vergrößerungsfunktion sowie die Zeitverläufe von Auslenkungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen an Punkten und Isolatoren sowie Belastungen an Isolatoren zur Verfügung. Zusätzlich wird die Summe der statischen und dynamischen Bodenbelastungen ermittelt. Die Ergebnisgrößen werden über Kontextmenüs oder das Menü "Ergebnisse" angezeigt.

#### 4.8.1 Statische Ergebnisse

##### 4.8.1.1 Hauptträgheiten

Befindet sich mindestens ein Körper auf dem Arbeitsblatt, berechnet **ISOMAG** die Schwerpunktlage und die Hauptträgheitsachsen des Systems. Die Darstellung erfolgt mit drei blauen Pfeilen, die je eine Hauptträgheitsrichtung angeben. Die Pfeile schneiden sich im Massenschwerpunkt. Der Ergebnisdialog (**Abb. 4.33**) zeigt die Lage des Massenschwerpunktes, die Winkel, um die man nacheinander drehen muss, um vom Schwerpunktsystem in das Trägheitshauptachsensystem zu gelangen, die Richtungskosinus zwischen SK und TK sowie die Gesamtmasse und die Hauptdrehträgheiten.



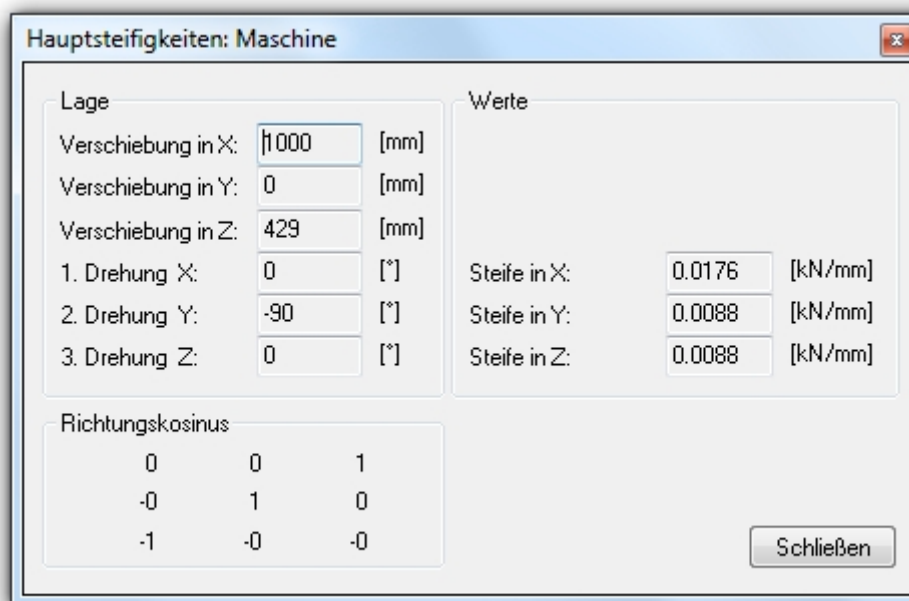
**Abb. 4.33** Ergebnisfenster zur Anzeige der Hauptträgheiten

##### 4.8.1.2 Hauptsteifigkeiten

Befindet sich mindestens ein Isolator auf dem Arbeitsblatt, berechnet **ISOMAG** die Hauptverschiebesteifigkeiten. Es werden Hauptverschiebesteifigkeiten für die Maschinen- und für die Fundamentlagerung (falls vorhanden) ausgerechnet. Angezeigt

werden nur jene Steifigkeiten, die größer als Null sind. Die Darstellung erfolgt mit grünen Pfeilen, welche je eine Hauptsteifigkeitsrichtung angeben. Falls ein Federschwerpunkt existiert, schneiden sich die Pfeile im Federschwerpunkt. Die grafische Darstellung der Pfeile wird bei jeder Modellmanipulation aktualisiert. So kann man beispielsweise, damit die Anordnung unter Eigengewicht waagrecht steht, die Isolatoren so lange manipulieren, bis eine Hauptsteifigkeit mit der z-Achse des Schwerpunktkoordinatensystems zusammenfällt (Hauptsteifigkeit geht vertikal durch den Schwerpunkt).

Der Ergebnisdialog (**Abb. 4.34**) zeigt die Lage des Federschwerpunktes, falls dieser existiert, die Winkel, um die man nacheinander drehen muss, um das globale System in das System der Hauptverschiebesteifigkeiten zu überführen, die Richtungskosinus zwischen beiden Systemen sowie die Hauptverschiebesteifigkeiten.



**Abb. 4.34** Ergebnisfenster zur Anzeige der Hauptsteifigkeiten

#### 4.8.1.3 Statische Bestimmtheit und Einhaltung statischer Grenzwerte


Nach jeder Berechnung prüft das Programm automatisch, ob das System statisch bestimmt ist, d. h., ob das Eigengewicht sowie alle eingeleiteten statischen Kräfte mit den vorhandenen Isolatoren aufgenommen werden können. Ist dies nicht der Fall, erhält man eine entsprechende Mitteilung. Bevor weitere Ergebnisse berechnet werden können, muss die statische Bestimmtheit hergestellt werden. Das ist beispielsweise durch das Hinzufügen weiterer Isolatoren möglich.

Gleichzeitig wird geprüft, ob die gemäß Abschnitt 4.6.4.5 eingegebenen statischen Grenzwerte in den Isolatoren eingehalten werden. Ist dies nicht der Fall, erhält man auch hier eine entsprechende Mitteilung, welche Isolatoren die Grenzwerte überschreiten. Bei Bedarf kann man sich die statischen Werte für den Isolator anzeigen lassen und mit den eingegebenen Grenzwerten vergleichen. Soll in der Datenbank nach einem anderen Isolator gesucht werden, empfiehlt es sich, die statische Belas-

tung des überbelasteten Elementes als Belastung in den Assistenten für die Schwingungsisolierung einzutragen, damit dies bei der Suche in der Datenbank berücksichtigt werden kann.

#### 4.8.1.4 Statische Verformungen und Kräfte

Statische Verformungen und Kräfte können für verschiedene Modellobjekte bzw. an verschiedenen Stellen des Modells berechnet werden. Dabei berücksichtigt das Programm die Einflüsse aller Elastizitäten, die Wirkung der Gewichtskraft ( $m_{\text{ges}} \cdot g$ ) in z-Richtung sowie die Wirkung statischer Kräfte/Momente. Ebenso gehören die konstanten Anteile von Impuls- und harmonischen Erregungen dazu.

Mit der Schaltfläche  kann eingestellt werden, ob die statischen Verformungen berechnet werden sollen. Das Nichtberechnen ist insbesondere bei Anlagen mit automatischer Niveauregulierung sinnvoll.

#### **Statische Verformungen in den Schwerpunkten**

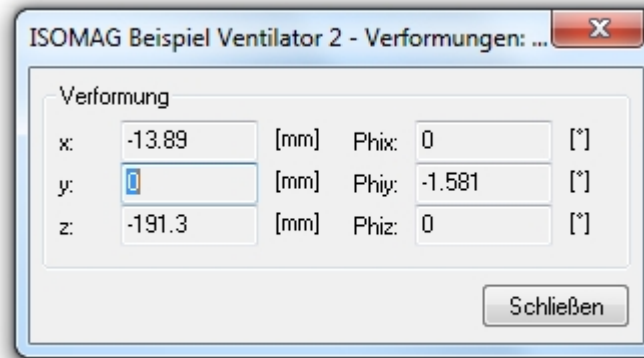
Im Fenster werden die Verformungen im Schwerpunktkoordinatensystem angezeigt. Bei Modellmanipulationen wird das Fenster automatisch aktualisiert, so dass man beispielsweise Isolatoren verschieben oder Zusatzmassen anbringen kann, bis für Neigungen (Drehwinkel  $\Phi_X$  und  $\Phi_Y$ ) im Fenster der Wert Null angezeigt wird. Damit steht beispielsweise das Fundament waagrecht. Die Ergebnisse stehen für alle drei Schwerpunkte (Maschine, Fundament, Gesamtschwerpunkt) zur Verfügung.

#### **Statische Verformungen in beliebigen Punkten**

Um Werte für die statischen Verformungen an einer beliebigen Stelle im Modell zu erhalten, fügt man zunächst einen Punkt gemäß **Abschnitt 4.6.7** an die gewünschte Stelle ein. Sollen die Werte bezüglich einer von den globalen Achsen abweichenden Richtung berechnet werden, dreht man den Punkt entsprechend.

Im Fenster sind die Verformungen bezüglich der Elementkoordinaten des Punktes zu sehen. Bei Modellmanipulationen wird das Fenster automatisch aktualisiert, so dass man beispielsweise Isolatoren verschieben oder Zusatzmassen anbringen kann, bis für Neigungen (Drehwinkel  $\Phi_X$  und  $\Phi_Y$ ) der Wert Null angezeigt wird. Damit steht beispielsweise das Fundament waagrecht.





**Abb. 4.35** Ergebnisdialog zur Anzeige von statischen Ergebnissen eines beliebigen Punktes

### Statische Verformungen und Kräfte in den Isolatoren

Die Kräfte ergeben sich aus dem Produkt von Steifigkeit und Verformung (vgl. Abschnitt 3.1.4.2). Angezeigt werden die Ergebnisse für den Bezugspunkt der Isolatoren (bezüglich Bezugskordinatensystem).

### Bodenbelastung

Am Objekt Umgebung lassen sich über das Kontextmenü die statische Bodenbelastung (Summe aller Gewichtskräfte sowie aller statischen und konstanten Kräfte) anzeigen. Im gleichen Fenster werden auch die Maximalwerte (phasenrichtig und betraglich) der dynamischen Bodenbelastung angezeigt.

#### 4.8.1.5 Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen

Über das Menü "Ergebnisse/Eigenfrequenzen..." lässt sich eine Tabelle mit den Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen des ungedämpften Systems öffnen, wie sie in **Abb. 4.36** zu sehen ist. Die Anzeige erfolgt zahlenmäßig. Die Komponenten der Eigenschwingformen werden bezüglich Schwerpunktkoordinatensystems angegeben. Die Auslenkungen sind so normiert, dass der Maximalwert jeder Schwingform gleich 1 ist. Bei Bedarf ist eine grafische Animation der Schwingformen über der Struktur gemäß **Abschnitt 4.8.3** möglich. Es werden alle von Null verschiedenen Eigenfrequenzen angezeigt. Die Fenstergröße lässt sich beliebig verändern, so dass alle Zahlen sichtbar gemacht werden können.

	1	2	3	4	5	6	7
fe[U/min]	46.633	62.850	99.498	121.162	136.997	156.013	194.319
om[rad/s]	4.883	6.582	10.419	12.688	14.346	16.338	20.349
X_M	0.000	0.826	-0.055	0.000	-0.000	-0.069	-0.016
Y_M	-0.388	0.000	-0.000	0.030	0.095	-0.000	-0.000
Z_M	-0.000	0.034	1.000	-0.000	0.000	-0.011	-0.416
PhiX_M	1.000	-0.000	-0.000	0.125	1.000	0.000	-0.000
PhiY_M	0.000	1.000	0.186	0.000	-0.000	1.000	0.404
PhiZ_M	0.051	0.000	0.000	1.000	-0.279	-0.000	0.000
Z_U	0.000	0.001	0.098	0.000	-0.000	-0.007	1.000

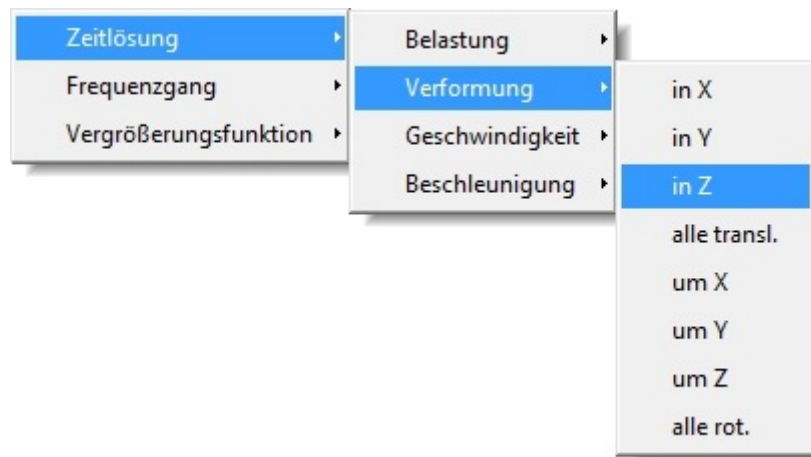
**Abb. 4.36** Ergebnisdialog zur Anzeige der Eigenfrequenzen und Eigenwerte/Schwingformen

#### 4.8.2 Dynamische Ergebnisse

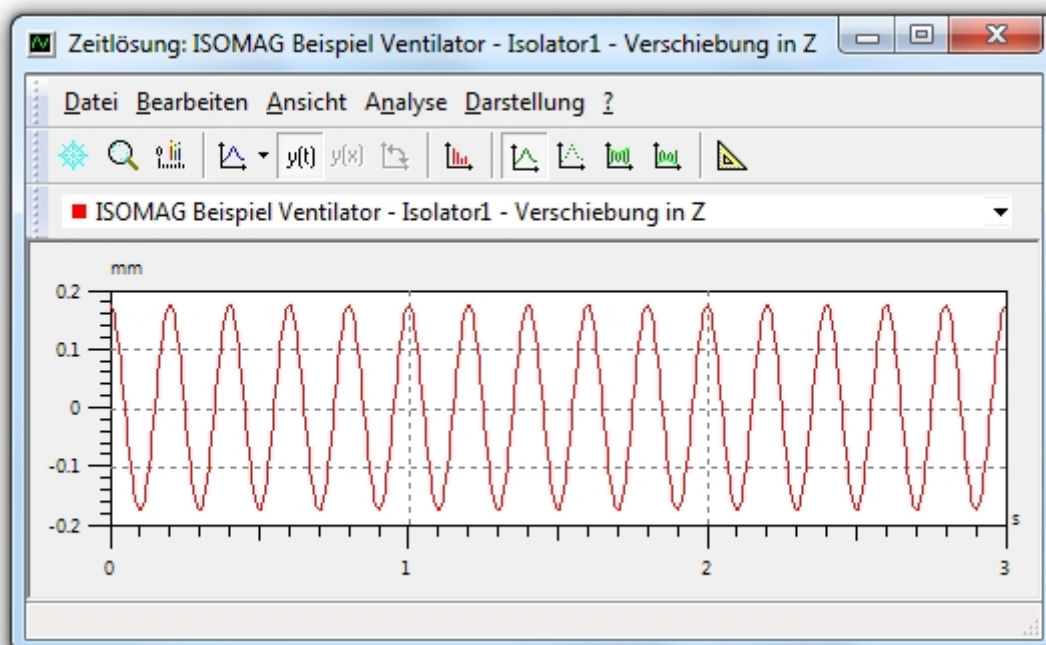
Die dynamischen Ergebnisse werden über das Kontextmenü "Ergebnisse Dynamik" angezeigt. Ihre Darstellung erfolgt in Ergebnisfenstern (vgl. Abschnitt 5.3). Sind mehrere Objekte markiert, so werden die Verläufe aller dieser Objekte in ein Ergebnisfenster übernommen. Damit ist ein Vergleich gleichartiger Ergebnisse an verschiedenen Objekten möglich (z. B. Belastungen der Isolatoren).

##### 4.8.2.1 Darstellung über der Zeit

Die Verläufe der Kräfte in den Isolatoren, auf den Boden (Umgebung), Verläufe von Verformungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen an Punkten und Isolatoren lassen sich über der Zeit berechnen und anzeigen. Auch Erregungen kann man über der Zeit darstellen. Außerdem gestatten die in den Ergebnisfenstern integrierten Funktionen die Berechnung von Mittel- und Extremwerten, die für die Schwingungsbeurteilung von Interesse sind. Näheres zu Ergebnisfenstern finden Sie im Abschnitt 5.3.



**Abb. 4.37** Darstellung dynamischer Ergebnisse über der Zeit



**Abb. 4.38** Darstellung eines Verformungsverlaufes über der Zeit

Bei der Berechnung der Zeitlösung werden alle im Modell definierten Erregungen berücksichtigt und phasengerecht überlagert. Das betrifft sowohl die Kraft- und Momentenerregung als auch Unwucht- und Stützerregung. Man kann nacheinander die Wirkung verschiedener Erregungen untersuchen: Durch entsprechende Parametereinträge (z. B. kann man die Amplituden nicht zu berücksichtigender Erregungen Null setzen) oder Modellmanipulationen (z. B. Löschen und Hinzufügen von Objekten) erreichen Sie, dass nur die für den jeweiligen Lastfall gewünschten Erregungen aktiviert sind.

Die Anzeige der Ergebnisse erfolgt im Koordinatensystem des Bezugspunktes (BK, vgl. Abschnitt 0). Für Isolatoren ist der Bezugspunkt der Anlenkpunkt, für Punkte der Mittelpunkt.

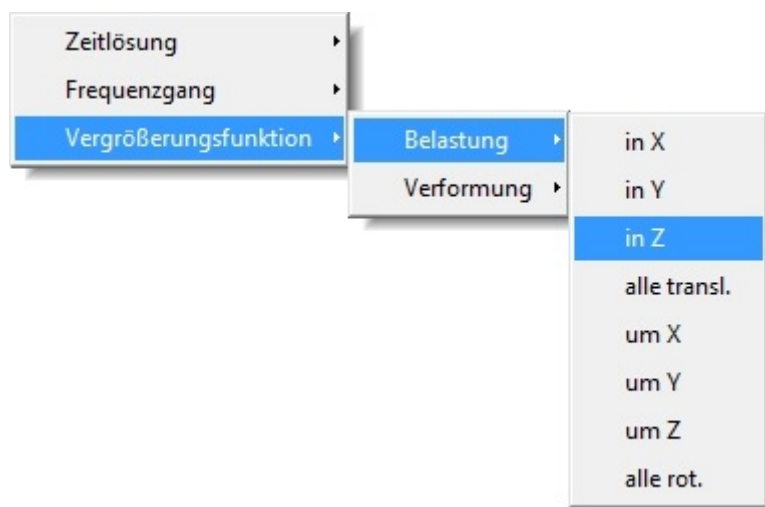
Belastungen über der Zeit werden ohne statische Lasten dargestellt. Dies ist sinnvoll, da sonst die statischen Anteile die dynamischen Effekte überdecken würden und wenig zu erkennen wäre. Ist die Maximalbelastung gesucht, müssen statischer und dynamischer Anteil addiert werden. Andererseits ist bei einer guten Schwingungsisolierung die Maximalbelastung etwa gleich der statischen Last (dynamische Einflüsse sind isoliert und vernachlässigbar).

#### 4.8.2.2 Darstellung über der Frequenz

Über der Frequenz lassen sich Amplitudengänge und Vergrößerungsfunktionen berechnen und anzeigen. Dies gilt für Kräfte und Verformungen an Isolatoren sowie für Verformungen an Punkten. Bei der Berechnung der Frequenzlösung werden die Amplituden aller im Modell definierten harmonischen Erregungen berücksichtigt und phasengerecht überlagert. Das betrifft sowohl die Kraft- und Momenten- als auch die Stützen- und Unwucherregung. Die Frequenz ist dabei für alle Erregungen gleich und durchläuft einen Bereich von 0 bis zur maximalen Frequenz, die unter "Berechnung/Einstellungen..." angegeben ist. Die eingegebenen Frequenzen der Erregungen sind für diese Rechnung ohne Bedeutung.

Sie können nacheinander die Wirkung verschiedener Erregungen untersuchen: Durch entsprechende Parametereinträge (z. B. kann man die Amplituden nicht zu berücksichtigender Erregungen Null setzen oder auf Impulserregung umschalten) oder Modellmanipulationen (z. B. Löschen und Hinzufügen von Objekten) erreichen Sie, dass nur die für den jeweiligen Lastfall gewünschten Erregungen aktiviert sind.

Die Anzeige der Ergebnisse erfolgt im Koordinatensystem des Bezugspunktes (BK, vgl. Abschnitt 0). Für Isolatoren ist der Bezugspunkt der Anlenkpunkt, für Punkte der Mittelpunkt.



**Abb. 4.39** Darstellung dynamischer Ergebnisse über der Frequenz

## Frequenzgang

Wie eben beschrieben, umfasst die Frequenzgangberechnung die Ermittlung der Antwortamplituden des Systems für die gegebenen harmonischen Erregungen. Für Punkte werden die Amplitudengänge der Verformungen (Verschiebungen bzw. Verdrehungen) berechnet. Für Isolatoren lassen sich die Amplitudengänge der Verformungen sowie die Reaktionskräfte über der Frequenz darstellen. Bei mehreren Erregungen erfolgt eine phasengerechte Überlagerung. Der zu einer bestimmten Frequenz im Frequenzgang gehörige Funktionswert entspricht so der Antwortamplitude des Systems, wenn alle definierten harmonischen Erregungen zugleich und mit dieser Frequenz erfolgen.

Durch geeignete Wahl der Erregungen können außerdem spezielle Übertragungsfunktionen berechnet werden. So entspricht beispielsweise die Verschiebung, die man für eine harmonische Erregung mit der Amplitude 1 bekommt (Phasenlage gleich Null), der dynamischen Nachgiebigkeit.

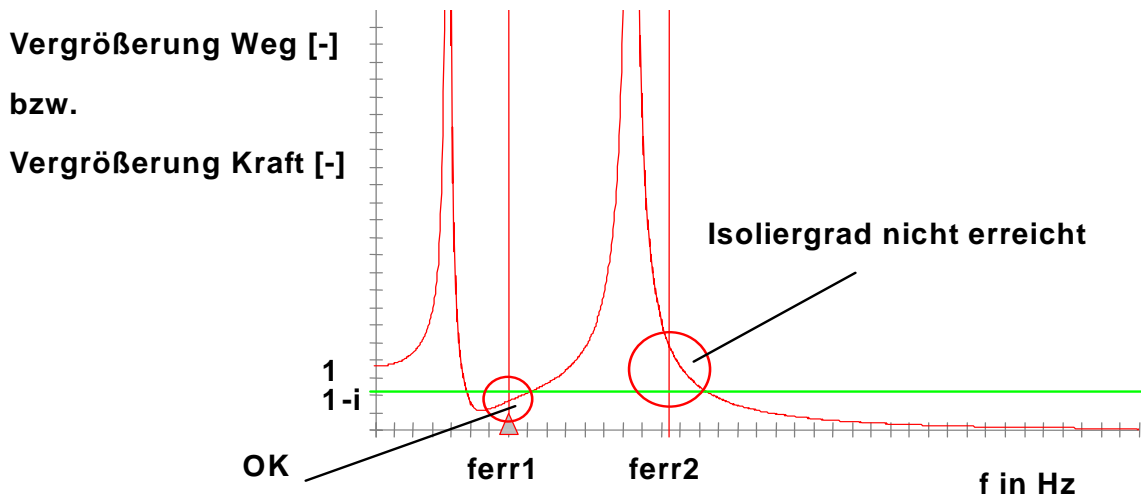
## Vergrößerungsfunktion

Die Vergrößerungsfunktion wird aus den Frequenzgängen (s. o.) abgeleitet, indem diese auf ihren ersten Wert normiert werden. Dieser erste Wert wird für eine Erregerfrequenz von 0 Hz berechnet. Er entspricht damit der Antwort des Systems, die sich ergibt, wenn die eingegebenen harmonischen Erregeramplituden statisch wirken. Damit entspricht die berechnete Vergrößerungsfunktion genau ihrer Definition und beginnt bei 0 Hz mit dem Wert 1. Die Vergrößerungsfunktion wird benutzt, um die Einhaltung des Isolationsgrades zu überprüfen, wie nachfolgend gezeigt wird.

## Darstellung des erreichten Isolationsgrades

Wie Sie den erreichten Isolationsgrad in den Ergebnisfenstern der Vergrößerungsfunktionen darstellen und kontrollieren können, wird nachfolgend beschrieben. Die Erregerfrequenzen werden mit senkrechten und der geforderte Isolationsgrad mit einer waagerechten Hilfslinie gekennzeichnet. Das Ein- und Ausblenden der Hilfslinien erfolgt im Eigenschaftsdialog unter der Registerkarte "Hilfslinien".

**Abb. 4.40** skizziert das Vorgehen bei der Prüfung auf Einhaltung des geforderten Isolationsgrades. Es ist eine Vergrößerungsfunktion dargestellt. Der geforderte Isolationsgrad  $i$  sowie die Erregerfrequenzen  $f_{err1}$  und  $f_{err2}$  sind eingezeichnet.




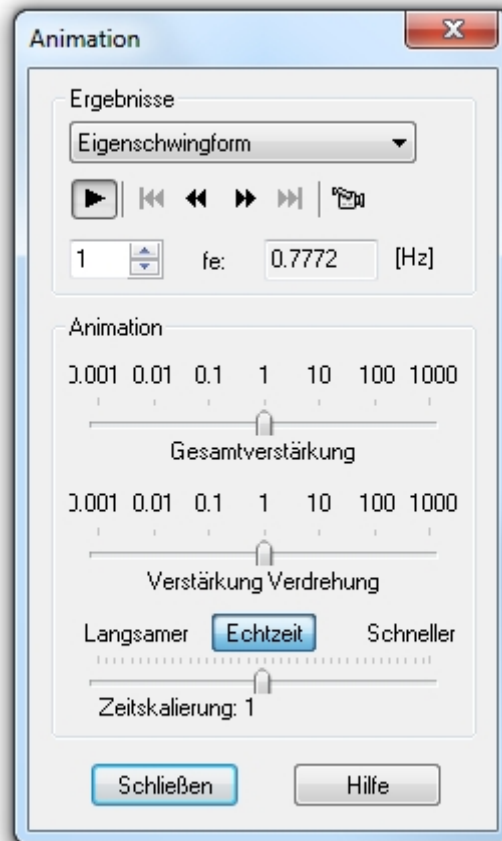
**Abb. 4.40** Prüfung auf Einhaltung des Isolationsgrades

Will man eine Schwingungsisolierung von Maschinen durchführen, ruft man die Vergrößerungsfunktion für die Belastung in den Isolatoren auf, da es sich um eine Kraft-erregung handelt. Liegt eine Isolierung von Geräten bzw. eine Stützerregung vor, betrachtet man die Vergrößerungsfunktion für die Verschiebungen, speziell die für den Massenschwerpunkt in z-Richtung. Damit lassen sich die für den sekundären Schwingungsschutz bedeutenden Fälle der Kraft- und der Stützerregung (vgl. **Abb. 1.1**) behandeln. In beiden Fällen ist es das Ziel der Schwingungsisolierung, dass die Vergrößerungsfunktion an den Stellen der Erregung (durch die senkrechten Linien markiert) den gewünschten Isolationsgrad (waagerechte Linie) erreicht bzw. überbietet. D. h., dass alle senkrechten Linien die Vergrößerungsfunktion unterhalb der waagerechten Linie schneiden. In **Abb. 4.40** ist dies nur für die erste Erregerfrequenz  $f_{err1}$  erreicht.

Benötigt man die Vergrößerungsfunktion der Verformung für eine beliebige Stelle, setzt man gemäß Abschnitt 4.6.7 einen Punkt und aktiviert dessen Darstellung. Durch Drehung des Punktes kann die Vergrößerungsfunktion für jede beliebige Richtung im Raum berechnet werden.

### 4.8.3 Animation

Die statische Verformung, die Betriebsschwingform sowie die Eigenschwingformen können per Animation veranschaulicht werden. Über den Menüpunkt "Ergebnisse" bzw.  in der Symbolleiste wird die Animation gestartet und beendet. Beim Start wird ein Dialog geöffnet, in dem die Eigenschaften der laufenden Animation verändert werden können (**Abb. 4.41**). Die Verfügbarkeit der Steuerelemente richtet sich nach der ausgewählten Animationsform.



**Abb. 4.41** Dialog der Einstellungen für die Animation

Im oberen Bereich des Dialogs kann die Animationsart gewählt werden. Direkt darunter befindet sich die Animationssteuerung, welche es erlaubt die Animation anzuhalten bzw. schrittweise durchzuführen. Es besteht auch die Möglichkeit die aktuelle Animation in Form eines Videos zu exportieren, siehe Abschnitt 4.8.4.

Die Steuerelemente im unteren Bereich ermöglichen es die Ergebnisse deutlicher darzustellen: die Animationszeit sowie die Ergebnisse selber können hier skaliert werden. Beachten Sie, dass sich die *Gesamtverstärkung* auf Verschiebung **und** Rotation auswirkt. Die *Verstärkung Verdrehung* wirkt nur auf die Rotationskoordinaten.

Das Schließen des Dialogs beendet die Animation nicht. Bei laufender Animation können weiterhin alle Manipulationen an den Ansichten oder am Modell vorgenommen werden. Die Ergebnisse werden automatisch aktualisiert. Das ist insbesondere zum "Gerade hinstellen" der Anordnung hilfreich.

### Statische Verformung

Wählt man diese Option, werden die statischen Verformungen des Starrkörpers maßstäblich über der Struktur dargestellt. Als statische Lasten wirken das Gewicht des Körpers und eingegebene statische Kräfte (vgl. Abschnitt 4.8.1.4). Für die Visualisierung der statischen Verformung stehen die Schieberegler *Gesamtverstärkung*

und *Verstärkung Verdrehung* zur Verfügung. Da hier ein Zustand und kein zeitlicher Verlauf dargestellt wird, ist die Animationssteuerung nicht verfügbar.

### **Betriebsschwingform**

Bei der Animation der Betriebsschwingform werden die sich aus den Zeitlösungen gemäß Abschnitt 4.8.2.1 ergebenden Verformungen des starren Körpers über der Struktur dargestellt. Ist die Erregung rein harmonisch, entspricht die Darstellung dem stationären Schwingungszustand. Bei reiner transients Erregung erhält man die Impulsantwort über der Zeit. Sind beide Erregungen definiert, ergibt sich eine entsprechende Überlagerung.

Die Länge der Animation entspricht der definierten Endzeit (siehe Abschnitt 4.7.1, die Animation wird fortlaufend durchgeführt. Die Zeitskalierung ist nach unten begrenzt durch die Anzahl der darstellbaren Stützstellen: je langsamer die Animation durchgeführt wird desto mehr Stützstellen werden benötigt um die Schwingung animieren zu können. Die Anzahl der Stützstellen richtet sich nach der maximalen Frequenz des Modells, die auch in den Projekteinstellungen definiert werden kann.


Die festgelegte Bildrate für die Animation liegt bei etwa 30 Bildern pro Sekunde, bzw. auch geringer je nach Hardwareausstattung und Modellgröße. Das ist bei der Auswertung zu beachten: in Echtzeit lassen sich so nur Schwingungen mit maximal 15 Hz korrekt darstellen. Um Unterabtastungseffekte zu vermeiden sollte eine geeignete Zeitskalierung verwendet werden.

### **Eigenschwingform**

Sie können jeweils eine der Schwingformen gemäß Abschnitt 4.8.1.5 animieren. Die Nummer ihrer Ordnung ist im Dialog (**Abb. 4.41**) einzugeben. Anhand der Darstellung erkennen Sie sehr gut, wie das System in der jeweiligen Frequenz schwingt, welche Isolatoren bei dieser Frequenz stark beansprucht sind und somit diese Frequenz wesentlich bestimmen. Daraus lässt sich ableiten, welche Isolatoren gegebenenfalls in Steife und Lage verändert werden müssen.

Die Animation der Eigenschwingform verläuft nicht in einem festen Zeitrahmen, es wird lediglich eine Periode der jeweiligen Schwingung dargestellt. Die Zeitskalierung ist nach oben begrenzt um eine optimale Darstellung der Schwingung zu gewährleisten, kann aber beliebig klein gewählt werden.

#### **4.8.4 Videoexport**

Die Animation lässt sich über die Schaltfläche  im Animationsdialog als Video exportieren. Für die Erstellung des Videos stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Es wird immer die aktuell eingestellte Schwingform exportiert. Die statische Verformung kann nicht als Video exportiert werden, verwenden Sie hierzu die Bildausgabe (Menü "Bearbeiten/Ansicht in die Zwischenablage").

Für das exportierte Video lassen sich Start- und Endzeit angeben. Bei der Betriebsschwingung sind dies die per default die Werte aus dem "Berechnung/Einstellungen..." Dialog. Es möglich aber auch möglich nur einen bestimmten



Zeitausschnitt zu exportieren. Für Eigenschwingformen existiert keine tatsächliche Zeit, es wird von **ISOMAG** festgelegt, dass eine Schwingform in 2 Sekunden ausgegeben wird.

Die Geschwindigkeit steuert wie schnell der angegebene Zeitraum als Video exportiert wird. Bei einem Zeitraum von 2 Sekunden entsteht ein Video der Länge 2 Sekunden wenn die Geschwindigkeit gleich 1 gewählt ist, und entsprechend 4 Sekunden falls Geschwindigkeit gleich 0.5.

Die Änderung der Bildwiederholrate hat keinerlei Einfluss auf die Länge des exportierten Videos, sondern lediglich auf die Anzahl der Einzelbilder die während einer (Video-)Sekunde angezeigt werden. Diese Einstellung beeinflusst effektiv die Dauer die benötigt wird das Video zu generieren, sollte aber auch nicht zu gering gewählt werden. Falls nicht genügend Daten zur Verfügung stehen um die angestrebte Bildanzahl zu generieren wird eine entsprechende Warnung ausgegeben. Zu dem Zusammenhang von Bildern pro Sekunde, Animationsgeschwindigkeit und maximale Auflösung der Berechnungsergebnisse sei auf Abschnitt **4.8.3** verwiesen.

Die Videoauflösung kann beliebig gewählt werden, richtet sich aber standardmäßig nach der aktuellen Fenstergröße von **ISOMAG**.




**Abb. 4.42** Videoexporteinstellungen. Links: Betriebsschwingung, rechts: Eigenschwingform

## 4.9 Dokumentation

Um die Ergebnisse zu dokumentieren, wird auf ein spezielles Programm zurückgegriffen, dass von **ISOMAG** aus über das Menü "Datei/Seitenansicht..." aufgerufen wird: den Druck-Designer. Über "Datei/Drucken" wird im Hintergrund ein Druck-Designer-Dokument erstellt und zum Drucken vorbereitet. Der Nutzer kann sowohl in **ISOMAG** als auch im Druck-Designer über den Windows-Standarddialog "Drucken" die Einstellungen individuell anpassen. Ausführliche Erläuterungen zu diesem Programm finden Sie im Abschnitt **5.4**.

## 4.10 Nützliche Hinweise/Troubleshooting

Problem	Abhilfe
Bei Änderungen am Modell gibt es lange Reaktionszeiten.	Die Berechnung der Ergebnisse für größere Modelle oder kleine eingestellte Zeitschrittweiten (Abschnitt 4.7.1) kann längere Zeit in Anspruch nehmen. Passen Sie in diesem Fall die Berechnungseinstellungen an oder schalten Sie die automatische Berechnung aus und erst dann wieder ein, wenn alle geplanten Änderungen erfolgt sind.
Beim Drucken erscheint die Meldung 'Server ist beschäftigt'.	Warten Sie einen Moment und klicken Sie anschließend auf "Wiederholen". Verringern Sie die Speicherauslastung (nur ein Modell öffnen, Schließen anderer Anwendungen, Vergrößern des realen oder virtuellen Arbeitsspeichers).
Beim Markieren von Elementen mittels Gummirahmen wird nichts oder zu viel markiert.	Kontrollieren und korrigieren Sie den Status der Markierungsschaltflächen der "Objekte" Symbolleiste Markieren Sie die gewünschten Elemente in der Baumansicht.
Berechnungsergebnisse erscheinen nicht im Ergebnisausdruck.	Automatisch erscheinen nur Eigenfrequenzen, Hauptträgheiten und -steifigkeiten sowie die dynamische Bodenbelastung im Druck. Andere Ergebnisse müssen als geöffnetes (ggf. minimiertes) Fenster vorliegen.
Die grafische Darstellung ist unkorrekt oder unvollständig.	Beschaffen Sie sich den aktuellen OpenGL-fähigen Bildschirmtreiber für Ihre Grafikkarte. Schalten Sie zum Grafik-Refresh im Menü "Ansicht" zwischen "Einer Ansicht" und "Vier Ansichten" um Öffnen Sie nur ein Modell-Fenster. Verringern Sie die eingestellte 3D-Hardwarebeschleunigung der Grafikkarte.
Es sind zu viele Koordinatensysteme sichtbar.	Markieren Sie im Projektbaum die unerwünschten Koordinatensysteme und schalten Sie sie via Kontextmenü-Visualisierung unsichtbar. Die Schaltfläche  blendet die Koordinatensysteme für die Hauptträgheiten und Hauptsteifigkeiten aus.
Es sind nicht mehr alle Symbole in den Symbolleisten sichtbar.	Nach einem Klick mit der rechten Maustaste auf die Symbolleiste können Sie Gruppen von Funktionen ein- und ausblenden.

<b>Problem</b>	<b>Abhilfe</b>
Der Ergebnisausdruck vor dem Druck soll angesehen und ggf. geändert werden.	Über Datei-Seitenansicht wird der Druck-Designer gestartet und eine Vorschau generiert. Im Druck-Designer kann das Ergebnis um eigene Objekte ergänzt werden. Zur Archivierung der Ergebnisse kann die Druck-Designer Datei auch gespeichert werden. Sollten die Möglichkeiten des Druck-Designers nicht reichen, so können Elemente der Ansicht kopiert, in andere Windows-Programme eingefügt, dort ergänzt und das Ergebnis wieder in den Druck-Designer eingefügt werden.
In der Datenbank wurde nach Isolatoren eines Herstellers gesucht und nichts gefunden. Eine neue Suche bei anderen Herstellern ist nicht möglich, da nur ein Hersteller angezeigt wird.	Das Ändern/Einfügen von Suchbedingungen ist so zu verstehen, dass immer aus der aktuellen Menge eine Untermenge gebildet wird. Um wieder an die gesamte Datenbank zu kommen, ist die einschränkende Bedingung zu löschen und über 'Start' die Gesamtmenge zu beschaffen. Dann können neue Bedingungen generiert werden.
Texte in der Statuszeile werden unvollständig dargestellt.	Die aktuelle Bildschirmauflösung ist geringer als 1024*768. Vergrößern Sie die Bildschirmauflösung.
Im Ergebnisausdruck fehlt die grafische Darstellung.	Schließen Sie ggf. andere Anwendungen. Es liegt ein Fehler in Ihrem Bildschirmtreiber vor. Verfahren Sie wie bei "Die grafische Darstellung ist unkorrekt oder unvollständig" Kopieren Sie die Grafik in die Zwischenablage (Menü: Bearbeiten/Ansicht in die Zwischenablage) oder erzeugen Sie ein Bildschirmfoto (Alt+Druck: aktives Fenster, Strg+Druck: Bildschirm) und fügen Sie es über die Zwischenablage in das Druck-Designer Dokument ein.
Die grafische Darstellung ist langsam	ISOMAG nutzt die 3D Grafikbibliothek OpenGL. Eine Grafikkarte mit 3D Hardwarebeschleunigung wird empfohlen. Achten Sie darauf, dass sie mit den aktuellen Bildschirmtreibern arbeiten.
ISOMAG ist instabil.	Es steht zu wenig Arbeitsspeicher zur Verfügung. Schließen Sie ggf. andere geöffnete Anwendungen.

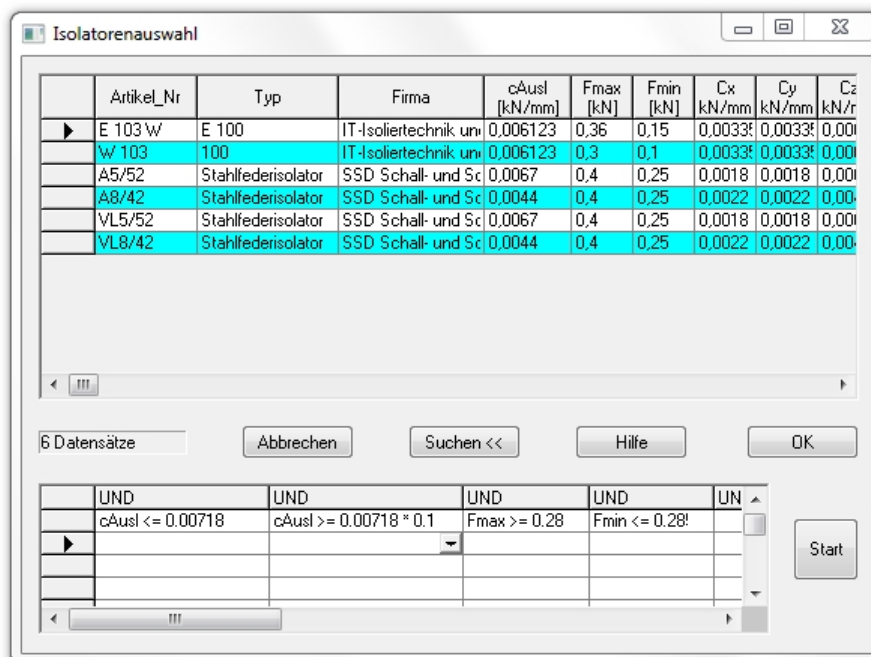
## 5 Spezielle Programmmodule

In den folgenden Abschnitten werden spezielle Programm-Module erläutert, die nicht direkt Bestandteil von **ISOMAG** sind, jedoch von dort aus gestartet werden:

- Datenbank-Auswahl
- Kennlinien
- Ergebnisfenster
- Druck-Designer

### 5.1 Auswahl von Isolatoren und Suche in der Datenbank

Über die Assistenten für einfache und doppelte Schwingungsisolierung (Menüpunkt "Berechnung") erreicht man eine umfangreiche Isolatoren-Datenbank, die mit dem Programm verbunden ist (**Abb. 5.1**). Mit den Ergebnissen der im **Abschnitt 4.7** beschriebenen Auslegungsrechnung werden solche Isolatoren ausgewählt, deren Steife in z-Richtung kleiner als die erforderliche Steife und deren maximale Kraft in z-Richtung größer als die maximale Belastung ist.



**Abb. 5.1** Dialog der Datenbankanbindung zur Katalogauswahl

Durch einen Klick in die Kopfzeile einer Spalte (Ergebnistabelle) kann deren Inhalt auf- bzw. abwärts sortiert werden. Die Kataloganzeige enthält vier Schaltflächen. Mit „Abbrechen“ beenden Sie die Auswahl, ohne dass Daten übernommen werden. Mit „OK“ oder Doppelklick auf eine Zeile wird der aktuell ausgewählte Datensatz übernommen. Erkennbar ist dieser an der Markierung - einem kleinen schwarzen Dreieck - auf der linken Seite.

Die Schaltfläche „Suchen“ blendet die anfangs nicht sichtbare Bedingungstabelle ein (und wieder aus). Dort sind jene Bedingungen sichtbar, die zur aktuellen Ergebnismenge führten. Die Suchkriterien können verändert werden. Damit ist es zum Beispiel möglich, nur Isolatoren bestimmter Hersteller zu berücksichtigen.

Doppelklickt man im Kopf der Ergebnis- bzw. Bedingungstabelle auf die jeweils rechte Begrenzungslinie, stellt das Programm automatisch die optimale Spaltenbreite ein - abhängig vom jeweils längsten Wert der Spalte. Es ist außerdem möglich, die Breite der Spalten durch manuelles Verschieben der Begrenzungslinien anpassen.

Das Programm interpretiert die Bedingungstabelle nach folgendem Schema (**Abb. 5.2**):

1. Bedingungen einer Zeile werden durch logisches UND miteinander verknüpft.
2. Die Zeilen der Tabelle werden mit ODER verknüpft.

B11	B12
B21	B22

=
(B11 UND B12) ODER (B21 UND B22)

**Abb. 5.2** Schema für die Auswertung der Bedingungstabelle

Um Suchkriterien einzugeben, klicken Sie auf das entsprechende Feld - eine Schaltfläche mit einem kleinen schwarzen Dreieck erscheint. Wenn man das Dreieck anklickt, öffnet sich ein weiteres Fenster (**Abb. 5.3**), in dem sich die Bedingungen eingeben lassen.

The screenshot shows a dialog box titled "Eingabe Bedingung". It has three main input areas: "Feldname" with a dropdown menu showing "Cz", "Relation" with a dropdown menu showing "<=", and "Wert" with a text input showing "0.035" and a unit dropdown showing "kN/mm". Below these is a "Lösche Bedingung" button and a "Steife in z" field with a dropdown arrow. At the bottom are three buttons: "OK", "Abbrechen", and "Hilfe".

**Abb. 5.3** Eingabebedingungen

**Feldname:** Wählen Sie das Feld für die Eingabebedingung aus.  
**Relation:** zur Verfügung stehen =, <, <=, >, >=, Zwischen (zwischen einem Wert1 und Wert2)

**Wert:** Setzen Sie hier den Wert (oder eine Formel, aus der sich der Wert ergibt) für die Suche ein oder nutzen Sie die Combobox, um den Wert aus der Datenbank aus-













zuwählen. Mit OK wird das Menü verlassen, die eingegebenen Parameter sind im Hauptmenü aktiv.

Wenn Sie alle Bedingungen eingegeben haben, beginnen Sie mit "Start" die Suche in der Datenbank. Die Anzahl der gefundenen Datensätze, für die die Auswahlkriterien erfüllt sind, wird angezeigt. Nach Auswahl eines Isolators klicken Sie auf OK - das Menü wird geschlossen, die Daten werden in den Assistenten übernommen und den markierten Isolatoren im Modell zugewiesen.

## 5.2 Kraft-Verformungs-Kennlinie

Nichtlineare Steifigkeiten von Isolatoren können durch Kraft-Verformungs-Kennlinien (F-s-Kennlinien) im Programm berücksichtigt werden. Zwecks Eingabe (oder Anzeige) der Kennlinie klickt man im Parameterdialog (Registerkarte "Steife") die entsprechende Option "Kennlinie", "Bearbeiten" an, worauf sich ein Dialog öffnet, wie er in **Abb. 5.4** zu sehen ist.

Der Dialog ermöglicht die komfortable Eingabe von Stützstellen einer F-s-Kennlinie - numerisch oder grafisch-interaktiv. Die Schaltflächen der Toolbar-Leiste haben folgende Funktionen:

	Kennlinie(n) laden		Lineare Interpolation*
	Kennlinie(n) speichern		Spline-Interpolation*
	Kennlinie(n) drucken		Keine Sonderbehandlung*
	neue Zeile hinter der aktuellen Zeile einfügen		Kurve(n) spiegeln*
	aktuelle Zeile löschen		Kurve(n) wiederholen*
	Treppen-Funktion*		Lineare/keine Extrapolation

\*Nachfolgend sind einige Beispiele dargestellt

## Beispiele:

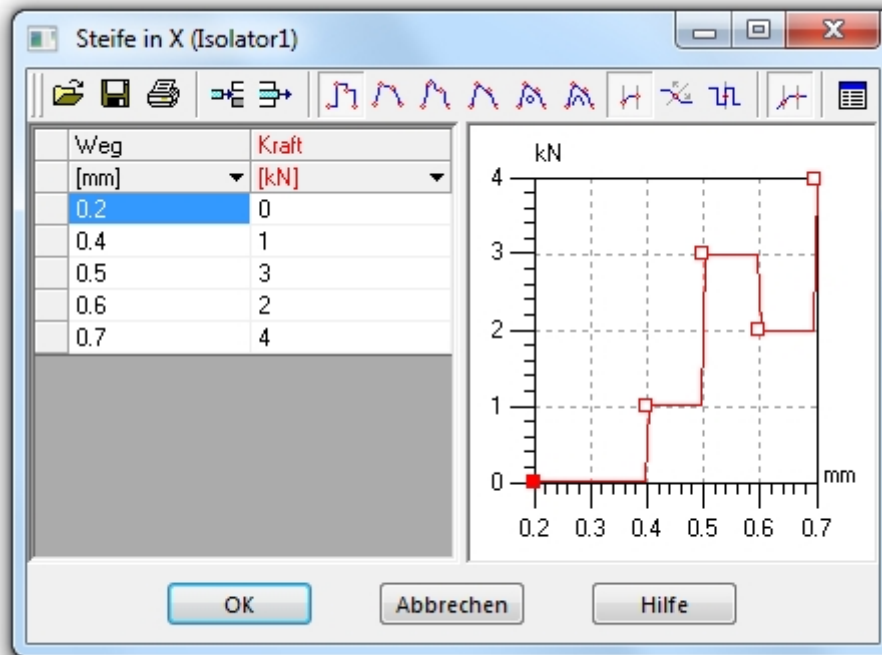


Abb. 5.4 Treppenfunktion

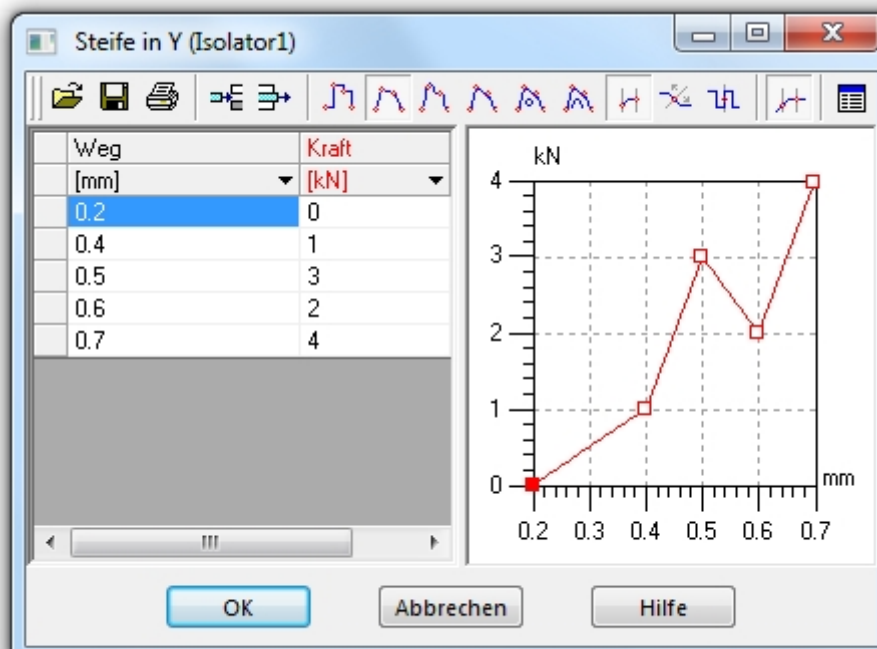
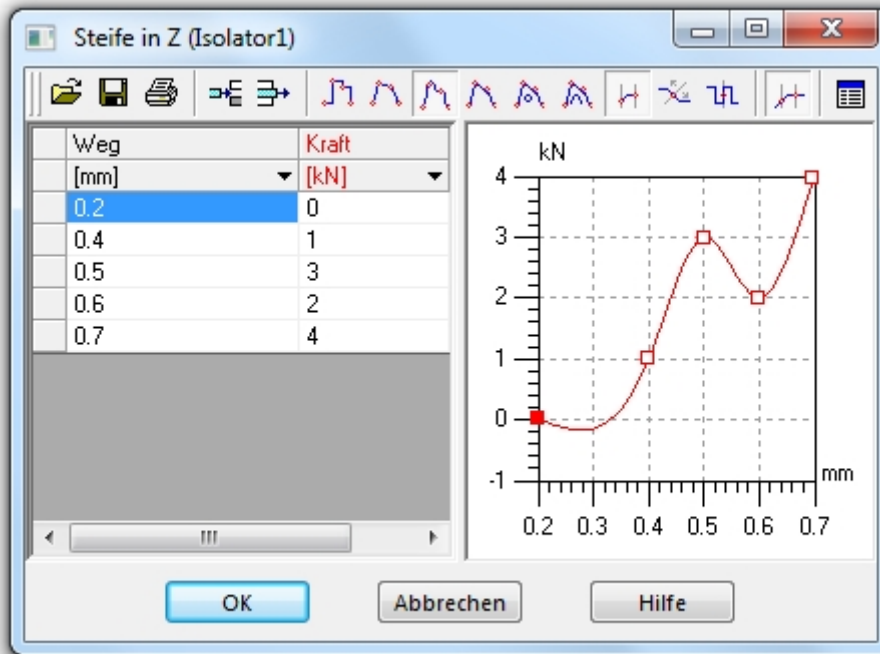
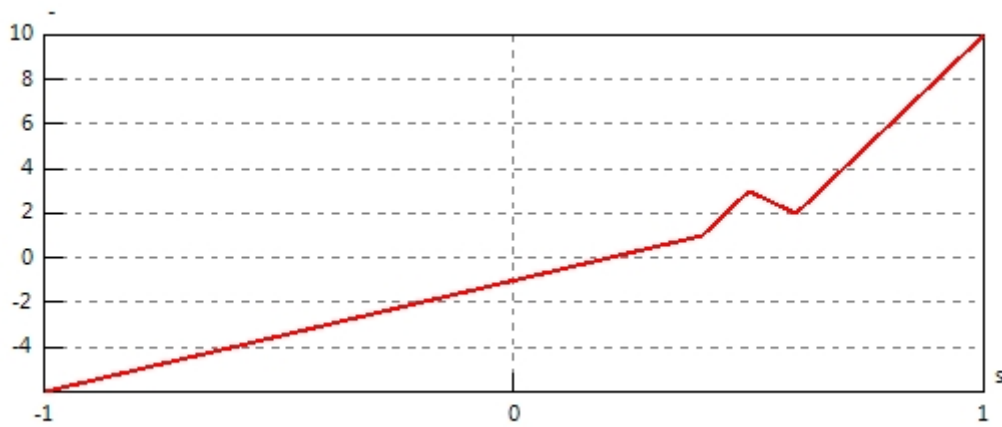


Abb. 5.5 Lineare Interpolation

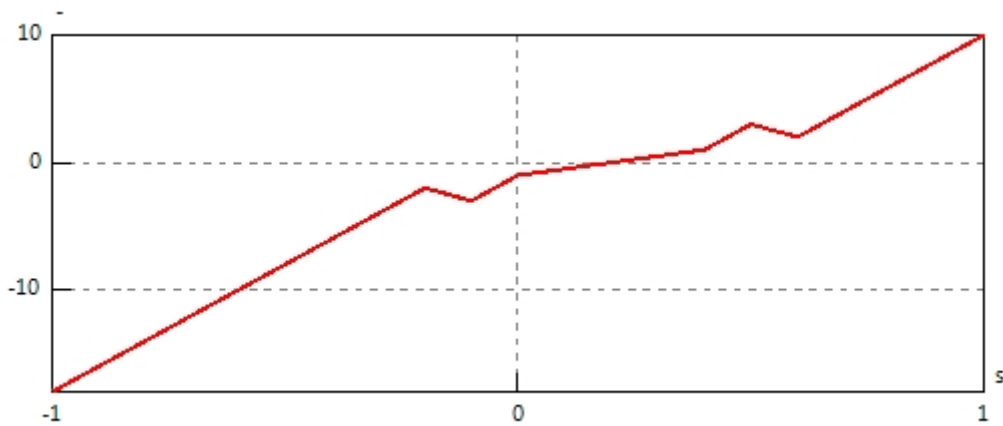


**Abb. 5.6** Spline-Interpolation

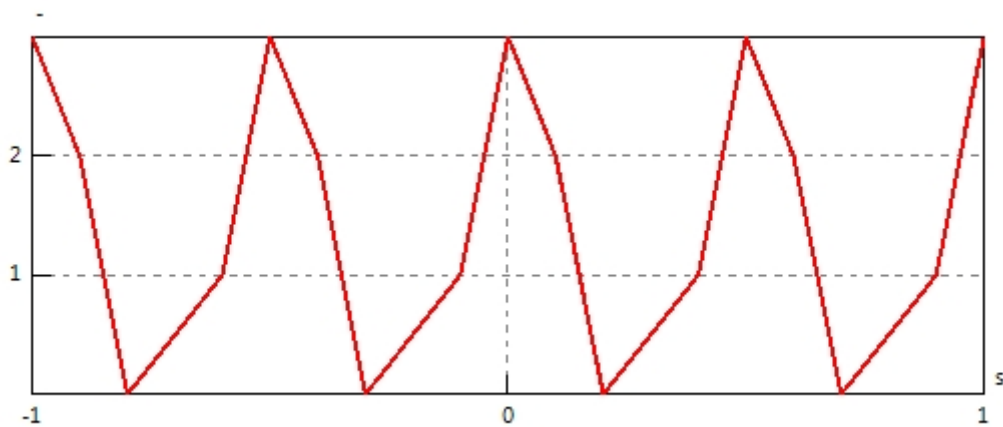


**Abb. 5.7** Keine Sonderbehandlung





**Abb. 5.8** Spiegelung



**Abb. 5.9** Periode

Innerhalb der Tabelle können die Werte der Kennlinie frei bearbeitet werden. Folgende Tasten haben dabei besondere Bedeutung:

TAB           bewegt Cursor zur nächsten Zelle

SHIFT+TAB   bewegt Cursor zur davorliegenden Zelle

ESC           bricht aktuellen Editiervorgang ab und schließt das Menü "Kennlinie"

ENTER        beendet aktuellen Editiervorgang

Pfeiltasten   ↑ bewegen den Cursor innerhalb einer Spalte nach oben und unten  
und ↓

Pfeiltasten   ← bewegen den Cursor innerhalb einer Zeile nach links und rechts  
und →

Eine Zeile markieren Sie durch einen Mausklick auf die jeweils erste Spalte (Cursor verwandelt sich in einen schwarzen waagerechten Pfeil). Bewegen Sie den Cursor über die letzte Zeile der Tabelle hinaus, wird automatisch eine neue Zeile angefügt.

Der aktuelle Kennlinien-Verlauf wird in der Vorschau grafisch dargestellt, wobei der in der Tabelle markierte Punkt in der Grafik ebenfalls markiert ist.

Es ist auch möglich, den Kennlinienverlauf grafisch-interaktiv zu manipulieren, indem zuvor markierte Stützpunkte mit der Maus angeklickt und verschoben werden. Folgende Tasten haben während der Manipulation mit der Maus eine besondere Bedeutung:

SHIFT    Maus lässt sich nur in Y-Richtung bewegen, X-Wert bleibt konstant

STRG    Maus lässt sich nur in X-Richtung bewegen, Y-Wert bleibt konstant

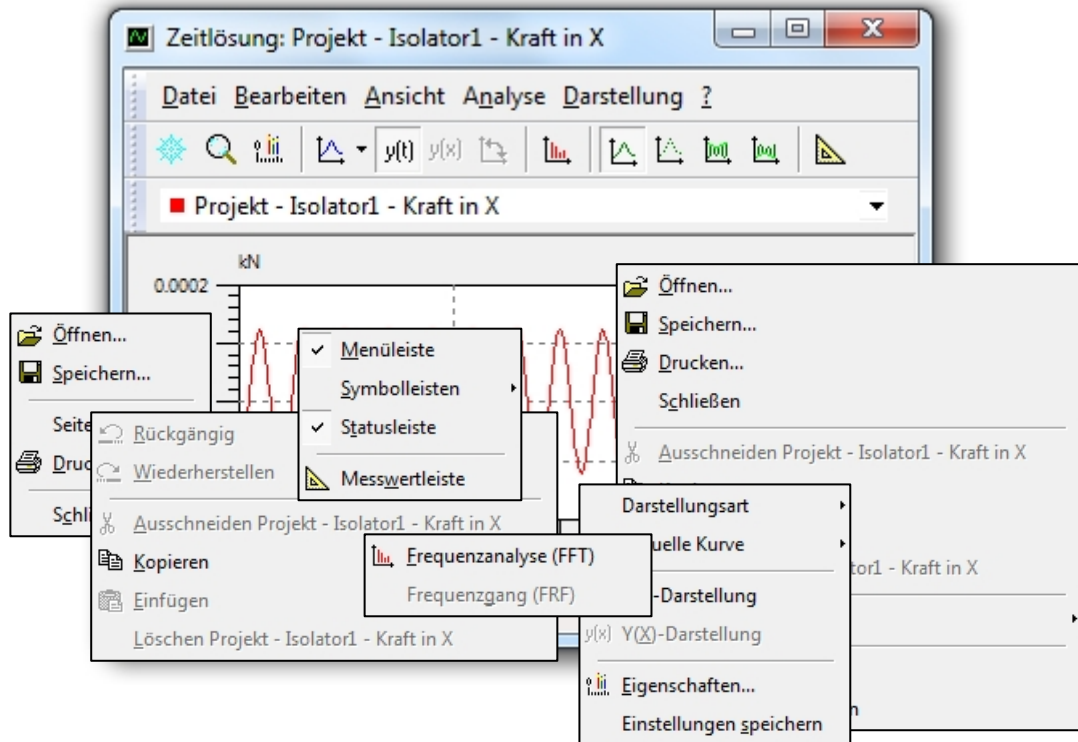
Durch einen Doppelklick mit der Maus in die Vorschau-Grafik können Sie neue Kennlinienpunkte erzeugen; ein Doppelklick auf einen vorhandenen Punkt löscht diesen.

Die Kennlinie beschreibt den Kraft-Verformungsverlauf im Inneren des Elements. Die Kräfte und Verformungen im Inneren sind bei Druckbelastung positiv und somit den Elementkoordinaten, die die Kraftwirkung der Isolatoren auf das Fundament beschreiben, entgegengerichtet. Wird die Kennlinie nur für den Druckbereich, also für positive Kräfte und Verformungen beschrieben, dann wird sie vom Programm automatisch gespiegelt und bei Bedarf auch für den Zugbereich verwendet. Ist die Kennlinie für Zug und Druck unterschiedlich, muss sie komplett eingegeben werden. Soll das Element nicht auf Zug belastbar sein, muss dies explizit durch wenigstens einen Punkt auf der negativen x-Achse beschrieben werden, falls lineare Extrapolation eingestellt ist. Wird ohne Extrapolation gearbeitet, liefert die Kennlinie bei Überschreitung des Definitionsbereiches für die Steifigkeit zu Null zurück.

### 5.3 Ergebnisfenster

Die Ergebnisfenster zeigen Verläufe über der Zeit oder über der Frequenz an. Die x-Achse besitzt also standardmäßig die Einheiten Sekunde oder Hertz. Die frei skalierbaren Fenster verfügen über mannigfaltige Menübefehle und Bedienungselemente (

**Abb. 5.10).** Die Ergebnisfenster für die dynamischen Ergebnisse (Zeitlösungen, Frequenzgänge, Vergrößerungsfunktionen) der einzelnen Objekte werden über das jeweilige Kontextmenü geöffnet.



**Abb. 5.10** Ergebnisfenster-Überblick

Die wichtigsten sind mehrfach vorhanden (Menü, Toolbar, Kontextmenü). Somit ist die Bedienung ständig gewährleistet, auch wenn Menü- und/oder Symbolleiste ausgeschaltet sind. Nachfolgend werden die einzelnen Funktionen erläutert. Der Umgang mit Windows-Standardbefehlen wird als bekannt vorausgesetzt.

### 5.3.1 Menü und Schaltflächen

#### 5.3.1.1 Dateimenü



**Einfrieren** des aktiven Verlaufes. Nach einer Neuberechnung bleibt dieser Verlauf erhalten und kann mit dem neuen Ergebnis verglichen werden.



**Speichern** aller im Ergebnisfenster dargestellten Verläufe auf einem Datenträger in einem der folgenden Formate:

- Text
- IEEE Binär
- ITI Binär
- ITI ASCII
- DIAdem Header

**Seite einrichten** öffnet den Dialog zur Einstellung des Seitenlayouts. Hier können die Papiergröße und -quelle ausgewählt, die Ausrichtung (Hoch-, Querformat) und die Ränder eingestellt werden. Diese Einstellungen beziehen sich nur auf den Druck der Ergebnisverläufe.

**Drucken** aller im Fenster dargestellten Ergebnisverläufe. Dabei wird das Diagramm auf die Seitengröße angepasst. Das bedeutet, es wird proportional der Fenstergröße verkleinert bzw. vergrößert, so dass eine Dimension (Breite oder Höhe) das Blatt jeweils ausfüllt.

#### 5.3.1.2 Menü Bearbeiten



**Kopieren** des aktuellen Verlaufs (Dreieck in der Legende) aus dem Ergebnisfenster in die Zwischenablage. Die Übertragung erfolgt in drei Formaten:


- einem internen Format zur **Kommunikation** der Ergebnisfenster untereinander,
- im Textformat in Form von Spalten und
- im Grafikformat in Form einer Windows-Metadatei (WMF-Datei).


Das weiter verarbeitende Programm kann dann über "Inhalte einfügen" das gewünschte Format auswählen.




Mit **Ausschneiden** wird der aktuelle Verlauf aus dem Ergebnisfenster entfernt und in die Zwischenablage gespeichert (vgl. Kopieren).


### 5.3.1.3 Menü Darstellung

 **y(t)-Darstellung:** Eine Ergebnisgröße ist als Kurve über der Simulationszeit dargestellt. Bei mehr als einer Ergebnisgröße mit unterschiedlichem physikalischem Inhalt in einem Fenster wird automatisch für jede Größe eine neue y-Achse erzeugt. Die Zuordnung der jeweiligen Achse zur entsprechenden Größe erfolgt über eine Staffelung der Maßeinheiten entsprechend der Legende. Entsprechendes gilt auch für die x-Achse.

 **y(x)-Darstellung:** Wird in einem Ergebnisfenster eine **gerade Anzahl** Ergebnisgrößen dargestellt, kann die jeweils zweite Größe über der vorhergehenden Größe dargestellt werden. Die Achszuordnung lässt sich über die Schaltfläche "Achsen tauschen" ändern.


 **Frequenzanalyse (FFT):** gestattet die Ermittlung eines Amplitudengangs über der Frequenz für ein vorliegendes Zeitsignal (y(t)-Darstellung) und zeigt ihn in einem neuen Fenster an. Alle FFT-Ergebnisfenster werden geschlossen, falls eine Neuberechnung erfolgt ist.


**Frequenzgang (FRF):** Wird eine gerade Anzahl Zeitverläufe (y(t)-Darstellung) im Ergebnisfenster dargestellt, kann man mit diesem Befehl einen **komplexen Übertragungsfrequenzgang** ermitteln. Das Ergebnis wird in einem neuen Fenster angezeigt. Alle Ergebnisfenster mit Übertragungsfrequenzgängen werden geschlossen, falls eine Neuberechnung erfolgt ist.

 **Zoom:** vgl. Abschnitt **5.3.3.5**

 **Eigenschaften:** vgl. Abschnitt **5.3.2**

**Einstellungen speichern:** Mit diesem Befehl werden alle Einstellungen gemäß Abschnitt **5.3.2** gespeichert und zum Öffnen aller weiteren Ergebnisfenster benutzt. Die gespeicherten Eigenschaften sind auch nach einem Neustart des Programms verfügbar.

 **Polarkoordinaten:** Verwenden Sie diesen Befehl, um eine Ergebnisgröße in Polarkoordinaten darzustellen. Die phi-Achse entspricht dabei der X-Achse und die r-Achse der Y-Achse. In dieser Darstellung ist das Ausmessen der Funktion nicht möglich.

 **Balkendiagramm:** Dieser Befehl aktiviert die Darstellung der Ergebnisgrößen als Balkendiagramm. Jede Ergebnisgröße entspricht einem Balken, deshalb erhält man nur eine sinnvolle Darstellung, wenn mehrere Ergebnisgrößen nebeneinander dargestellt werden sollen. In dieser Darstellung ist das Ausmessen der Funktion nicht möglich.



**Liniendarstellung (default):** Der Verlauf wird als Linienzug dargestellt



**Punkte:** Nur die Punkte, an denen wirklich gerechnet wurde, werden angezeigt



**Obere Hüllkurve:** Die obere Hüllkurve (Verbindungsline der lokalen Maxima) wird eingeblendet.



**Untere Hüllkurve:** Die untere Hüllkurve (Verbindungsline der lokalen Minima) wird eingeblendet.



**Ausmessen:** Ergebnisverläufe ausmessen

Die Einstellung bezieht sich immer auf die jeweils aktive Kurve.

Alle Darstellungsarten können auch gleichzeitig verwendet werden. Sind alle Schaltflächen deaktiviert, wird der Verlauf nicht dargestellt. Damit können Sie Verläufe auch temporär ausblenden.

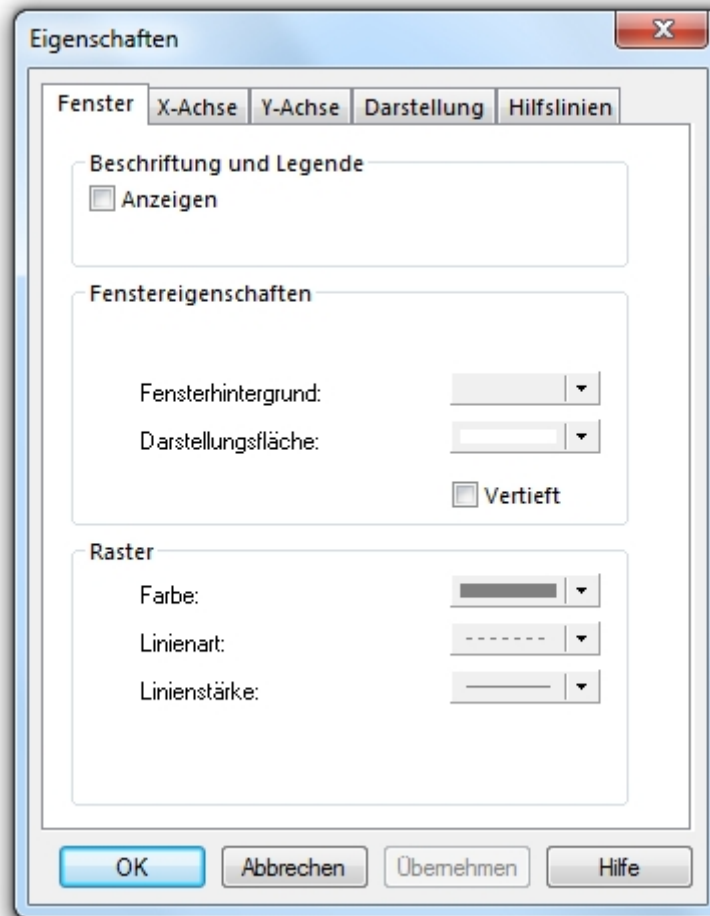
### 5.3.2 Anpassung der Eigenschaften



Jedes Ergebnisfenster und darin jede einzelne Kurve können Sie durch Ändern zahlreicher Eigenschaften Ihren individuellen Bedürfnissen anpassen. Dazu wird der im folgenden Bild gezeigte Dialog "Eigenschaften" geöffnet (Menü "Darstellung", Kontextmenü oder Symbolleiste).

#### 5.3.2.1 Fenstereigenschaften

**Abb. 5.11** zeigt die Registerkarte zur Einstellung der Eigenschaften, die sich auf das gesamte Fenster beziehen. In diesem Menü legen Sie fest, welche Farbe der Fensterhintergrund sowie die eigentliche Darstellungsfläche für die Kurven haben. Stimmen Sie diese Farben sinnvoll mit denen der Kurven ab (vgl. Abschnitt **5.3.2.3**)! Für das Raster sind eine beliebige Farbe sowie verschiedene Linienarten und -stärken wählbar.



**Abb. 5.11** Dialog Eigenschaften, Registerseite Fenster

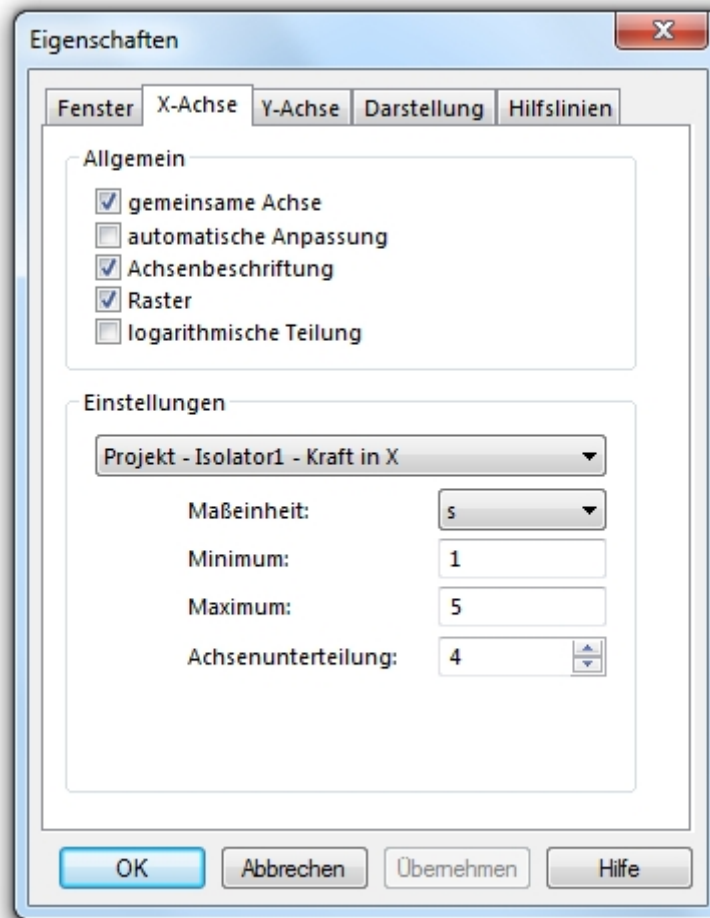
### 5.3.2.2 Eigenschaften der Achsdarstellung

X- und Y-Achse haben die gleichen Eigenschaften, die jeweils getrennt einstellbar sind. **Abb. 5.12** zeigt beispielhaft die Registerseite für die Y-Achse. Die X-Achse wird ebenso parametrisiert.

Enthält das Ergebnisfenster mehrere Kurven, kann für die jeweilige Koordinate (X, Y) eine **gemeinsame Achse** (✓) dargestellt werden. Ansonsten bekommt jede Kurve ihre eigenen Achsen, die auch getrennt einstellbar sind. Ist **automatische Anpassung** gewählt (✓), wird aus allen (gemeinsame Achse) oder aus der jeweiligen Kurve Minimum und Maximum berechnet und die Achse so dargestellt, dass alle Werte sichtbar sind und das Fenster optimal genutzt wird. Minimum, Maximum und Achsenunterteilung sind dann nicht mehr wählbar.

**Die Achsenbeschriftung** (Abszisse/Ordinate sowie die Maßeinheit) ist wahlweise zu- oder abschaltbar (✓). Mit **Raster** unterteilt man die Achse in Abschnitte. Die Farbe des Rasters sowie dessen Linienart und -stärke wählen Sie unter der Registerkarte "Fenster". Die Anzahl der Teilungen kann - für die Achse jeder Kurve getrennt - mit dem Parameter **Achsenunterteilung** eingestellt werden. Jedes Teilstück wird dabei mit 10 unbeschrifteten Unterteilungen versehen. Die Option "auto-

matische Anpassung" darf in diesem Fall nicht aktiviert sein. Wahlweise kann jede Achse mit einer logarithmischen Teilung (✓) dargestellt werden.



**Abb. 5.12** Dialog Eigenschaften, Registerkarte Y-Achse

Abhängig von den bisherigen Einstellungen in diesem Dialog wählen Sie weitere Eigenschaften - für die Achse jeder Kurve getrennt: Zunächst wird in der Combobox die gewünschte Kurve selektiert. Dann bestimmen Sie eine Maßeinheit und legen Werte für Minimum, Maximum (z. B. zur Ausschnittbildung) und Achsenunterteilung fest.

**Besonderheiten:**

- Für die **Y-Achse** kann zusätzlich eine Achsrichtung (positive Y-Achse nach oben bzw. nach unten) durch Anklicken der entsprechenden Schaltfläche gewählt werden.
- 
- Enthält das Ergebnisfenster eine Darstellung in Polarkoordinaten, werden im Eigenschaftsdialog statt X- und Y-Achse die phi- und r-Achse eingestellt. Nicht benötigte Parameter sind ausgeblendet. Die **phi-Achse** gestattet die Einstellung der Lage des Koordinatenursprungs in Grad im mathematisch positiven Sinn. Die **r-**



**Achse** erfordert die Spezifikation des leeren Bereichs im Zentrum des Polardialogramms.

### 5.3.2.3 Eigenschaften der Kurvendarstellung

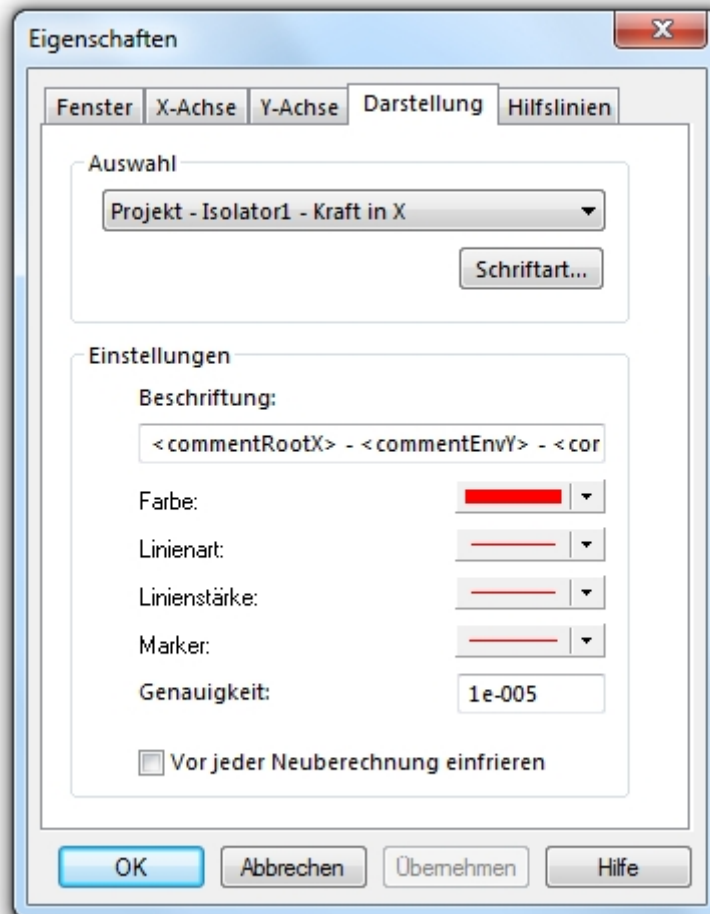
Farbe und Linienart, in der die Verläufe und Kurven gezeichnet werden, sowie die Farbe des Hintergrundes sind voreingestellt bzw. werden vom System zunächst automatisch gewählt (erste Kurve rot, zweite grün, dritte blau, ...).

Jeder einzelnen Kurve können individuell Farbe, Linienart und -stärke sowie Marker zugeordnet werden. Diese Einstellungen nimmt man unter der Registerkarte "Darstellung" vor (**Abb. 5.13**). Die Schaltfläche Schriftart verzweigt zum gleichnamigen Windows-Standarddialog. Die gewählte Schriftart bezieht sich auf alle Beschriftungen im Ergebnisfenster. Um die Kurvendarstellung anzupassen, verfahren Sie wie folgt:

1. Wählen Sie eine Kurve aus der Combobox aus.
2. Bestimmen Sie die gewünschten Eigenschaften mittels Comboboxen bzw. durch Eingabe im Editfeld.

**Marker** stellen jeden Kurvenpunkt dar. Das heißt diese Einstellung ist nur sinnvoll, wenn die Punktzahl einer Kurve nicht zu groß ist.

Wenn Sie das Kontrollkästchen "Vor jeder Neuberechnung einfrieren" anwählen, bleibt der jeweilige Verlauf auch nach einer Neuberechnung erhalten. Damit sind Veränderungen der Ergebnisse durch Parametervariationen leicht erkennbar.



**Abb. 5.13** Dialog Eigenschaften, Registerkarte Darstellung

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, mit Hilfslinien zu arbeiten (**Abb. 5.14**). Voreingestellt ist die mögliche Anzeige von Minimum und Maximum, von Mittel- und Effektivwerten. Weitere Hilfslinien können bei Bedarf neu angelegt und später wieder gelöscht werden. Es lassen sich jeweils Farbe, Linienart und -stärke bestimmen.

Einige Ergebnisverläufe enthalten bereits vordefinierte Hilfslinien (Frequenzen harmonischer Erregungen, Isoliergrad).

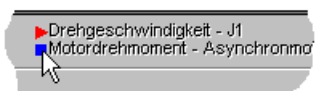


Abb. 5.14 Registerkarte "Hilfslinien" im Eigenschaftsdialog

### 5.3.3 Weitere Funktionen

Über das bisher Gesagte hinaus halten die Ergebnisfenster Bedienungsmöglichkeiten bereit, die nicht auf den ersten Blick sichtbar sind. Sie werden nachfolgend beschrieben.

#### 5.3.3.1 Aktueller Verlauf




Die Legende (rechts oben im Ergebnisfenster, aktivierbar in den Einstellungen unter "Darstellung/ Fenster/Beschriftung und Legende") beinhaltet alle in diesem Fenster dargestellten Ergebnisverläufe in der Reihenfolge, wie sie in das Fenster aufgenommen wurden. Der **aktuelle Verlauf** ist an einem **Dreiecksmarker** zu erkennen. Um eine andere Kurve zur aktuellen zu machen, genügt ein einfacher Mausklick auf das kleine Quadrat einer Größe. Ein Umschalten ist auch mittels "TAB"-Taste möglich. Bei mehr als einer Funktion beziehen sich alle Aktionen (Ausschneiden, Löschen, Ausmessen etc.) auf den aktuellen Verlauf.

Klickt man mit der rechten Maustaste auf einen Marker, öffnet ein Popup-Menü zur Auswahl einer neuen Farbe für die entsprechende Kurve.

Sind mehrere Y-Achsen dargestellt, so erfolgt die Beschriftung der Achsen mit der Maßeinheit in derselben Höhenstaffelung wie die Legende. Somit ist die Zuordnung der jeweiligen Ergebnisgröße und der zugehörigen Achse gewährleistet.

### 5.3.3.2 Kurvenverlauf umbenennen


Die Kurvenverläufe in den Ergebnisfenstern können umbenannt werden. Dazu öffnen Sie den Eigenschaftsdialog  des Ergebnisfensters mit der Schaltfläche und wechseln zur Dialogseite "Darstellung". Wählen Sie unter Auswahl ihren Verlauf aus und geben Sie den gewünschten Namen unter "Beschriftung" ein. Bei der Eingabe können Sie folgende Schlüsselwörter verwenden, die vom Programm entsprechend ersetzt werden:

**Tab. 5.1** Schlüsselwörter zur Kurvenbeschriftung

Schlüsselwort	Bedeutung
<commentEnv>	Name des Objektes
<comment>	Name des Ergebnisses

Auch eingefrorene Verläufe sowie aus Dateien geladene Kurven können so aussagekräftig beschriftet werden.


### 5.3.3.3 Maßeinheiten ändern

 Klickt man mit der rechten Maustaste auf die Maßeinheit einer Achse, erhält man ein Popup-Menü mit allen für diese Achse möglichen Maßeinheiten. Durch Auswahl einer neuen Einheit erfolgt die Umschaltung. Es werden alle Werte umgerechnet und die Achse neu beschriftet.

### 5.3.3.4 Ausmessen von Kurven

#### **Wertanzeige**

Für die Darstellungsformen  $y(t)$  und  $y(x)$  können die Werte der Funktion an einem beliebigen Ort der Darstellung abgegriffen und angezeigt werden.

 Dazu bewegt man den Mauszeiger in den Bereich der grafischen Darstellung und drückt die linke Maustaste. Der Cursor verwandelt sich in ein Fadenkreuz und markiert den aktuellen Punkt der Mausposition. In der Statuszeile erscheinen zwei Felder, welche den Wert der Mausposition ( $X=...$  und  $Y=...$ ) anzeigen.


Beim Ausmessen von Funktionen sind zwei Modi zu unterscheiden:

1. Bei  $y(t)$ -Darstellungen "klebt" das Fadenkreuz an der aktuellen Kurve, d. h. es wird exakt dieser Verlauf "abgefahren". Sind mehrere Funktionen in einem Er-

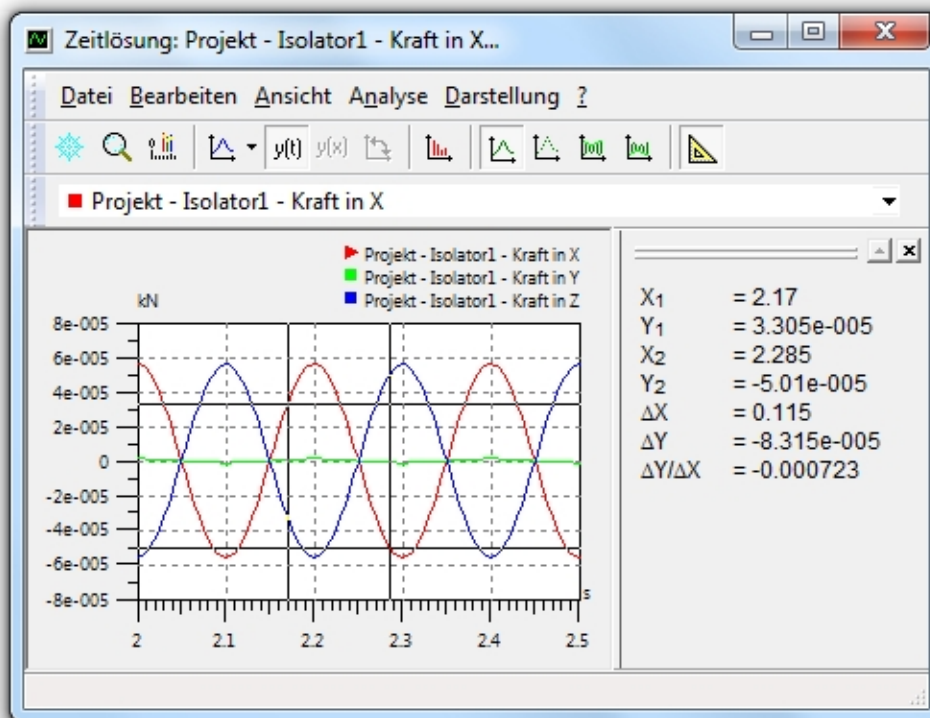
gebnisfenster dargestellt, ist die aktuelle Kurve am Dreiecksmarker in der Legende erkennbar.

- Bei  $y(x)$ -Darstellungen ist das Fadenkreuz frei beweglich. Das ist notwendig, damit auch nicht eindeutige Punkte (u. a. bei Schleifen) ausgemessen werden können. Die Anzeigefelder enthalten die Werte der aktuellen Mausposition. Um in diesem Fall eine größere Genauigkeit zu erzielen, kann man beispielsweise einen Ausschnitt bilden. Dies ist im Folgenden beschrieben.

### Ausmessen

Durch Betätigen der Schaltfläche  "Ausmessen" lässt sich eine wesentlich komfortablere Funktion aktivieren.

Auf der rechten Fensterseite wird ein Anzeigebereich eingeblendet, in dem verschiedene Werte angezeigt werden. Ein erstes Fadenkreuz erzeugen Sie mit dem ersten Klick in den Diagrammbereich. Ein weiteres mit einem zweiten Klicken. Die senkrechten Linien der Fadenkreuze können mit der Maus verschoben werden. Die Werte im Anzeigebereich werden entsprechend aktualisiert. Mit der rechten Maustaste können die Werte in die Zwischenablage kopiert werden.



**Abb. 5.15** Ergebnisfenster mit aktiviertem Ausmessfenster

Das Ausmessen kann durch erneutes Betätigen des Buttons beendet werden.

### 5.3.3.5 Darstellung zoomen

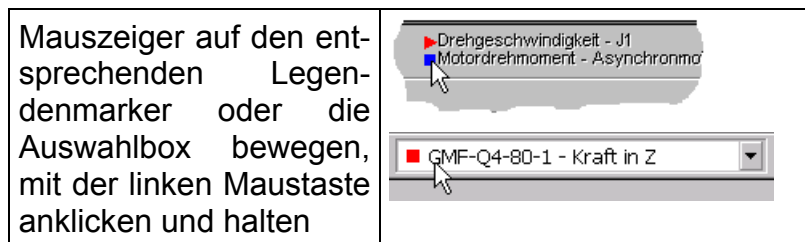
Natürlich kann man sich einen Ausschnitt der Kurvendarstellung auch genauer ansehen. Alternativ zu der Variante über Minimum- und Maximum-Eingabe im Eigenschaftsdialog (**Abb. 5.12**) kann ein Ausschnitt interaktiv mittels Lupenfunktion gebildet werden. Dazu klickt man auf die Lupe in der Symbolleiste (Menü "Darstellung/Zoom") und zieht über dem interessierenden Bereich ein Rechteck auf (mit linker Maustaste 1. Punkt anklicken, diagonal aufziehen und loslassen).

Soll ein wertgenauer Ausschnitt gebildet werden (z. B. für Dokumentationszwecke), ist die Eingabe von Minimum und Maximum im Eigenschaftsdialog zu bevorzugen (automatische Anpassung ausschalten!).

Mit Doppelklick auf die Darstellungsfläche wird zur Originaldarstellung (gesamte Kurve) zurückgekehrt. Die automatische Anpassung der Achsen wird dabei wieder aktiviert.

### 5.3.3.6 Drag&Drop für Ergebnisse

Die Ergebnisgrößen verfügen über einen Drag&Drop-Mechanismus. Man kann sie "in die Hand" nehmen und bewegen. Dazu fasst man die gewünschte Größe mit der Maus an:



Mit einer Ergebnisgröße "in der Hand" (an der Maus) sind dann nachfolgend beschriebene Bedienhandlungen einfach und schnell auszuführen:

**Ergebnisgröße verschieben:** Lassen Sie die Ergebnisgröße über dem Zielergebnisfenster fallen (Maustaste loslassen). Die verschobene Größe wird mit den dort bereits vorhandenen Funktionen gemeinsam dargestellt.

**Ergebnisgröße kopieren:** Drücken Sie während des Haltens zusätzlich die Strg-Taste (Cursor bekommt ein Plus) und lassen Sie die Ergebnisgröße über dem Zielergebnisfenster fallen (Maustaste loslassen). Die kopierte Größe wird mit den dort bereits vorhandenen Funktionen gemeinsam dargestellt.

**Ergebnisgröße entfernen:** Über das Kontextmenü kann die aktuelle Kurve aus dem Ergebnisfenster gelöscht werden. Es ist auch möglich, die "angefasste" Größe über dem (Windows-)Papierkorb fallen zu lassen (Maustaste loslassen).

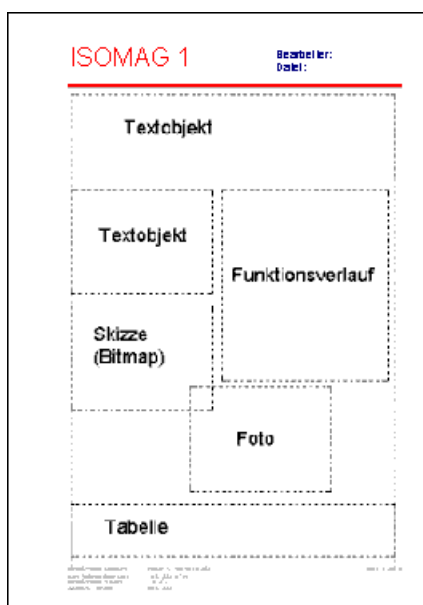
## 5.4 Druck-Designer

Der Protokolldruck erfolgt nicht unmittelbar im Programm **ISOMAG**: Die Menüfunktion "Datei/Drucken" startet das Programm "Druck-Designer" und löst die Generierung des Protokollausdrucks aus. Das vollständige Protokoll enthält nacheinander folgende Abschnitte:

- Allgemeine Angaben
- Modellansicht
- Parameter von:
  - Umgebung
  - Maschine
  - Fundament
  - Isolatoren
  - Erregungen
- Ergebnisse

### 5.4.1 Übersicht

Der Druck-Designer ist ein separates Werkzeug zur Gestaltung des Ausgabeprotokolls. Diese OLE-Container-Anwendung verwaltet die verschiedensten Objekte auf einem Arbeitsblatt (Dokument), vgl. **Abb. 5.16**. Das Ausgabeprotokoll wird auf einem vordefinierten Template erstellt. Dieses Template kann der Programm-Administrator an spezielle Forderungen anpassen. An einigen grundlegenden Fragestellungen soll der Umgang mit diesem Werkzeug erklärt werden.



**Abb. 5.16** Prinzipieller Aufbau des Ausgabeprotokolls

### Wie kommen die Objekte auf mein Arbeitsblatt?

1. Wichtigste Quelle ist das Programm **ISOMAG**. Führen Sie dort den Befehl "Seitenansicht" aus, wird ein Ausgabeprotokoll generiert, das die o. g. Objekte enthält.
2. Eine weitere Quelle ist die Zwischenablage. Befindet sich dort ein geeignetes Objekt, z. B.
  - ein vorher kopiertes Objekt,
  - der Inhalt eines Ergebnisfensters,
  - ein Bitmap aus einem Zeichenprogramm,
  - Objekte aus CorelDraw oder kurz gesagt,
  - Objekte aus allen OLE-fähigen Anwendungen,
 kann es mit dem Befehl "Bearbeiten/Einfügen" vor einem markierten Objekt bzw. am Ende auf dem Arbeitsblatt platziert werden.
3. Eine dritte Möglichkeit ist mit dem Befehl "Bearbeiten/Neues Objekt einfügen..." gegeben. Hiermit wird der Windows-Mechanismus zum Einfügen von OLE-Objekten in Dokumente aktiviert (vgl. Windows-Online-Hilfe).

### Wie verschwindet ein Objekt von meinem Arbeitsblatt?

Sie markieren das überflüssige Objekt per Mausklick. Anschließend wird entweder die Entf-Taste gedrückt oder der Befehl "Bearbeiten/Löschen" ausgeführt. Das Objekt wird aus dem Dokument gelöscht. Außerdem können alle im Objektbaum (**Abb. 5.17**) befindlichen Objekte in der Baumansicht aus- bzw. eingeblendet werden (vgl. Abschnitt **5.4.1.1**).

### Wie verschiebe ich ein Objekt auf der aktuellen Seite?

Anklicken mit linker Maustaste, Taste gedrückt halten und an gewünschte Stelle verschieben, Taste loslassen. Die Reihenfolge der Objekte (vgl. Abschnitt **5.4.1.1**) wird nicht verändert.

### Wie bekomme ich ein Objekt von der aktuellen Seite auf eine andere Seite?

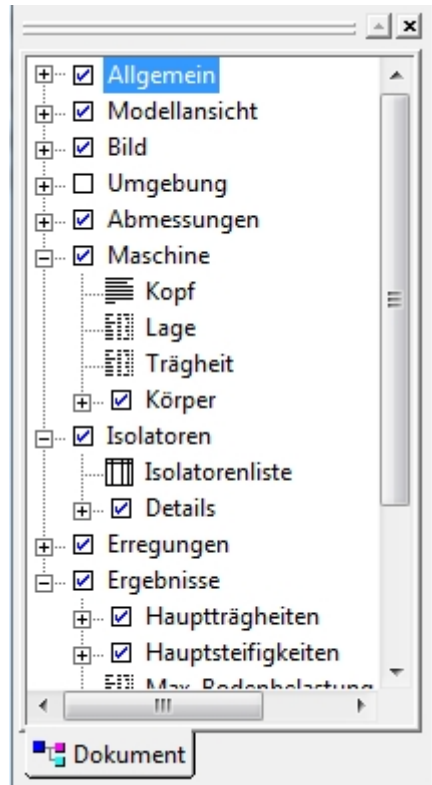
Objekt markieren, in die Zwischenablage kopieren und zur neuen Seite blättern. Dort das Objekt markieren, vor dem das verschobene Objekt platziert werden soll. Objekt aus der Zwischenablage einfügen. Die Reihenfolge der Objekte (vgl. Abschnitt **5.4.1.1**) wird dabei verändert.

#### 5.4.1.1 Dokumentorganisation und Explorer

Der Druck-Designer verwaltet alle OLE-Objekte in einem Dokument in Form einer verketteten Liste. Die Objekte werden in der Reihenfolge ihrer Aufnahme in die Liste auf dem Arbeitsblatt dargestellt. Das Programm sorgt dabei selbständig für Seitenumbrüche. Die Reihenfolge ist immer dann wichtig, wenn Objekte nebeneinander bzw. überlappend dargestellt werden sollen. Es kann nur ein nachfolgendes Objekt ein vorhergehendes überdecken (vgl. Abschnitt **5.4.4**).



Die Objektliste wird vom aufrufenden Programm als Liste mit mehreren Hierarchie-Stufen generiert. Sie kann vom Anwender anschließend durch Löschen oder Hinzufügen einzelner Objekte verändert werden. Neue Objekte werden vor dem markierten Objekt oder am Ende hinzugefügt. Der im **Abb. 5.17** dargestellte Explorer (Objektansicht) zeigt die Objektliste und deren Hierarchie-Stufen an einem Beispiel. Er wird mit dem Befehl "Ansicht/Explorer" ein- bzw. ausgeblendet und kann sich rechts oder links vom Hauptfenster befinden.



**Abb. 5.17** Explorer

Der Umgang mit einer derartigen Baumansicht entspricht dem Windows-Standard. Hinzu kommt folgende Möglichkeit, die Darstellung zu beeinflussen: Durch Klick auf ein Symbol im Explorer wird das entsprechende Objekt aus- (Symbol grau) oder ein-geblendet (Symbol farbig), ohne dass es aus der Liste gelöscht wird. Ganze Hierarchie-Ebenen lassen sich so durch Markierung (✓) aus- oder einblenden.

## 5.4.2 Objekttypen und deren Manipulierung

Vom Berechnungsprogramm **ISOMAG** werden folgende Objekttypen in das Ausgabeprotokoll eingebaut:

### 5.4.2.1 Grafiken

Grafiken, wie beispielsweise die Modellansicht und Ergebnisverläufe, sind statische Objekte. Sie können nicht bearbeitet werden.

#### 5.4.2.2 Parameter

Parameterobjekte enthalten in tabellarischer Form alle Eingabeparameter eines Modellobjekts (Symbol, Wert, Maßeinheit, Bemerkung). Sie sind eine Sonderform der Tabellenobjekte. Im aktiven Status (vgl. Abschnitt **5.4.4**) sind folgende Manipulationen möglich:

- Bearbeiten kann man die Schriftarten von Überschrift und Text. Getrennte Einstellungen sind möglich. Dazu wird mittels Befehl "Format/Schriftart..." der Windows-Standarddialog zur Schriftauswahl geöffnet.
- Die Spaltenbreite ist manipulierbar. Gehen Sie dazu über eine entsprechende Spaltentrennung (Cursor verwandelt sich in:  $\text{+|+}$ ) und verschieben Sie sie nach links oder rechts (klicken, halten, schieben, loslassen).

#### 5.4.2.3 Tabellen

Tabellenobjekte enthalten Projektdaten, Zusammenfassungen, Stückliste etc. eines Projekts. Im aktiven Status (vgl. Abschnitt **5.4.4**) sind folgende Manipulationen möglich:

- Bearbeiten kann man die Schriftarten von Überschrift und Text. Getrennte Einstellungen sind möglich. Dazu wird mittels Befehl "Format/Schriftart..." der Windows-Standarddialog zur Schriftauswahl gerufen.
- Die Spaltenbreite ist manipulierbar. Gehen Sie dazu über eine entsprechende Spaltentrennung (Cursor verwandelt sich in:  $\text{+|+}$ ) und schieben die Trennung nach links oder rechts (klicken, halten, schieben, loslassen).

#### 5.4.2.4 Texte

Unter Text versteht man beispielsweise Überschriften ("Stückliste", "Modulansicht", ...) und selbsteingefügte Textblöcke. Im aktiven Status (vgl. Abschnitt **5.4.4**) sind folgende Manipulationen möglich:

- Eingefügte Textblöcke sind editierbar. Beliebige Texteingaben sind möglich.
- Die Schriftart ist einstellbar. Wählen Sie dazu den Befehl "Format/Schriftart...". Der Windows-Standarddialog zur Schriftauswahl wird geöffnet.
- Eine Ausrichtung des Textes innerhalb des Textobjekts (links, zentriert, rechts) ist möglich. Wählen Sie dazu den Befehl "Format/Ausrichtung" aus. Diese Ausrichtung ist nicht zu verwechseln mit der Objektausrichtung (Symbolleiste, vgl. Abschnitt **5.4.4**).

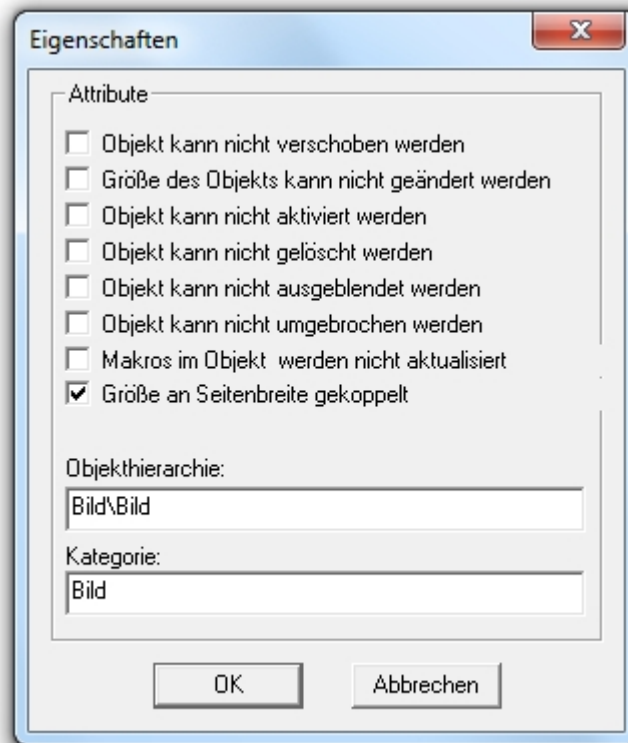
#### 5.4.2.5 Sonstiges

Darüber hinaus kann das Ausgabeprotokoll Objekte aller registrierten OLE-Typen enthalten (Texte aus Word, Tabellen aus Excel, Bitmaps, Corel-Bilder, Flussdia-

gramme, CAD-Zeichnungen usw.). Im aktiven Status erhält man die zum Objekt gehörige Arbeitsumgebung und kann dieses vor Ort bearbeiten.

### 5.4.3 Objekteigenschaften

Jedes Objekt besitzt eine Reihe von Attributen. Diese Attribute werden vom generierenden Programm voreingestellt und können nur im Administrator-Mode geändert werden (vgl. Abschnitt 5.4.5).



**Abb. 5.18 Objektattribute**

Der Dialog zum Bearbeiten der Objekteigenschaften wird mit dem Befehl "Bearbeiten/Eigenschaften..." geöffnet. Die Attribute sind weitgehend selbsterklärend. Hier noch einige Ergänzungen:

**Objekt kann nicht umgebrochen werden:** Text- und Tabellenobjekte werden normalerweise optimal an die Seitenlänge angepasst und wenn nötig auf die neue Seite umgebrochen. Diese Eigenschaft kann deaktiviert werden, um beispielsweise eine Tabelle immer im Ganzen zu sehen.

**Makros im Objekt werden nicht aktualisiert:** Der Druck-Designer kann mit Makros arbeiten, die vom Programm aktualisiert werden. Makros sind durch ein führendes Ampersand (&) gekennzeichnet. Schalten Sie diese Eigenschaft aus, werden die im Template enthaltenen Makros vom Programm nicht mit den aktuellen Werten belegt. **ISOMAG** kann folgende selbsterklärende Makros aktualisieren: &Kunde, &Ort, &Angebot, &FileName, &LastWrite, &Version, &DBVersion, &Page, &Pages.

**Größe an Seitenbreite gekoppelt:** Ist dieses Attribut gesetzt, wird die Breite des Objektes automatisch an die Breite der Seite angepasst. Ändert sich die Seitenbreite ("Datei/Seite einrichten..."), wird die Objektbreite aktualisiert.

Mit der Objekthierarchie wird die Stellung im Objektbaum (vgl. Abschnitt 5.4.1.1) festgelegt.

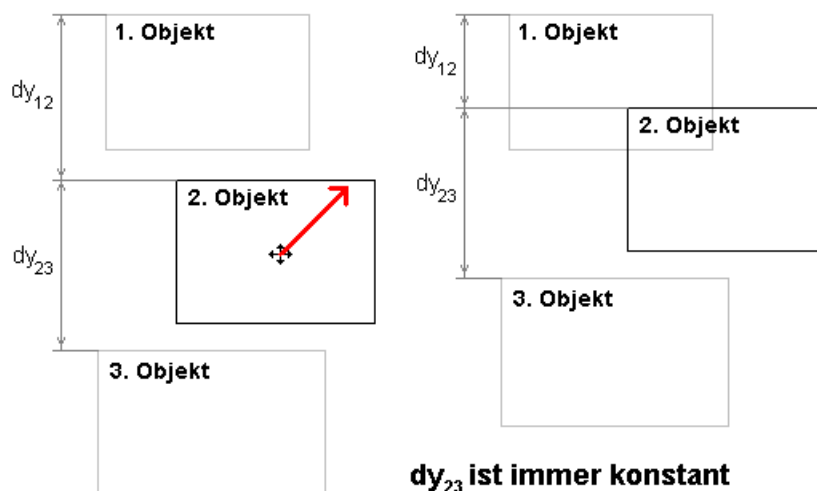
#### 5.4.4 Zur Bedienung

Der folgende Abschnitt erläutert detailliert die Bedienung des Druck-Designers sowie seine spezifischen Befehle und Schaltflächen. Windows-typische Bedienhandlungen (laden, speichern, drucken, kopieren, einfügen etc.) werden als bekannt vorausgesetzt.

Ein Objekt kann markiert oder aktiviert werden. Die Markierung bzw. Aktivierung des aktuellen Objekts wird durch Klicken außerhalb dieses Objekts beendet. Die Darstellung wird aktualisiert. Es kann immer nur ein Objekt markiert oder aktiviert sein. Damit ist eine gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Objekte nicht möglich. **Aktivierte Objekte** haben ein spezielles Menü, das ihrer Herkunft entspricht. Die Bearbeitung wird deshalb hier nicht weiter beschrieben. Manipulationsmöglichkeiten **markierter Objekte** werden nachfolgend erklärt. Beachten Sie, dass durch die Programmvorgabe von **ISOMAG** nur ausgewählte Objekte manipulierbar sind.

##### 5.4.4.1 Verschieben

Bewegen Sie den Cursor auf das markierte Objekt, klicken es mit der linken Maustaste an, halten die Taste gedrückt und schieben das Objekt an die gewünschte Stelle. Sinnvoll ist ein Verschieben auf der Seite. Soll ein Objekt auf eine andere Seite platziert werden, schneidet man es an der aktuellen Position aus und fügt es an der neuen Position wieder ein. Durch Verschieben wird in vertikaler Richtung immer nur der Abstand zum vorhergehenden Objekt verändert. Der Abstand zum nachfolgenden Objekt bleibt unverändert (**Abb. 5.19**). Sinnvoll ist eine Bildgestaltung von oben nach unten.



**Abb. 5.19** Verschiebung eines Objekts

#### 5.4.4.2 Skalieren

Ein markiertes Objekt verfügt über 8 Marker zum Skalieren. Fassen Sie einen Marker mit der Maus an (Mauszeiger auf den Marker bewegen, Cursor wandelt sich, mit linker Maustaste anklicken, Taste gedrückt halten) und verändern Sie die Objektgröße durch Schieben der Maus in die gewünschte Richtung. An der neuen Position die Maustaste loslassen. Sollen die Proportionen beim Skalieren mit einem Eckpunkt erhalten bleiben, ist während des Schiebens zusätzlich die Strg-Taste zu drücken.

#### 5.4.4.3 Blättern und Zoomen


Das Dokument erstreckt sich im Allgemeinen über mehrere Seiten. Die jeweils aktuelle Seite sowie die Seitenanzahl werden unten in der Statuszeile angezeigt. Folgende Funktionen stehen zum Blättern und Zoomen zur Verfügung:


 Erste Seite: Wechsel zur ersten Seite

 Vorherige Seite: Wechsel zur vorhergehenden Seite

 Nächste Seite: Wechsel zur nächsten Seite

 Letzte Seite: Wechsel zur letzten Seite

 75% Darstellungsmaßstab: Mittels dieser Combobox kann ein vordefinierter Maßstab zur Ansicht der Seite gewählt werden. Diese Einstellung bezieht sich nicht auf den Ausdruck.

 Darstellungsbereich: Mit der Lupenfunktion lässt sich ein beliebiger Ausschnitt wählen. Dazu klickt man auf die Lupe in der Symbolleiste und zieht über dem interessierenden Bereich ein Rechteck auf. Die Rückkehr von einem gezoomten Ausschnitt erfolgt über die Auswahl eines vordefinierten Maßstabs (s. o.).

#### 5.4.4.4 Bereich wählen

Die Bearbeitung erfolgt immer nur im aktuellen Bereich. D. h., wenn Sie ein Objekt in der Kopfzeile bearbeiten wollen, müssen Sie zuerst die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste anklicken.


 Seitenbereich: der Seitenbereich wird aktuell

 Kopfzeile: der Kopfbereich wird aktuell

 Fußzeile: der Fußbereich wird aktuell

#### 5.4.4.5 Formatieren


Jedes Objekt kann per Mausklick auf die entsprechende Schaltfläche horizontal auf dem Arbeitsblatt ausgerichtet sowie eingerahmt werden:

 linksbündige, zentrierte oder rechtsbündige Ausrichtung des aktuellen Objektes

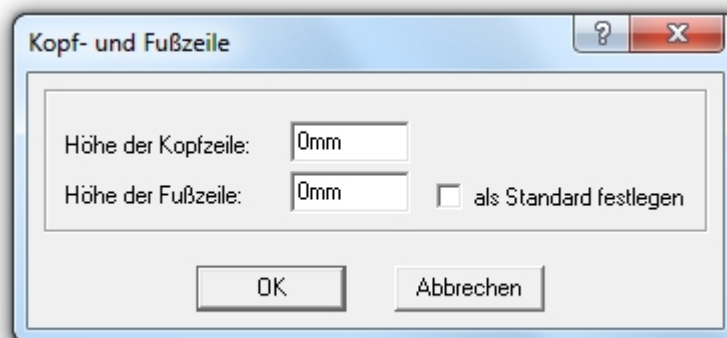
 Objekt erhält eine Linie an der jeweils hervorgehobenen Seite

Die Aktion erfolgt durch Mausklick auf die entsprechende Schaltfläche. Mittels der Comboboxen kann man vor der auszuführenden Aktion Linienstärke und Farbe für die Umrahmung auswählen.

#### 5.4.4.6 Sonstiges

 **Textobjekt einfügen:** Mit dieser Schaltfläche wird vor dem markierten Objekt bzw. am Ende des Dokuments ein nutzerdefiniertes Textobjekt eingefügt. Es lässt sich gemäß Abschnitt 5.4.2.4 bearbeiten.

Menübefehl "**Format/Kopf- und Fußzeile**": Diese Einstellungen sind insbesondere bei der Erstellung neuer Templates wichtig. Die Höhe von Kopf- und Fußzeile wird im Template gespeichert. D. h., wenn Dokumente mit vordefinierten Templates erstellt werden, haben nachträglich als Standard festgelegte Kopf- und Fußzeilen-Einstellungen keine Auswirkung. Die Standardeinstellung gilt für neu erstellte Templates und Dokumente.



**Abb. 5.20** Dialog Kopf- und Fußzeile

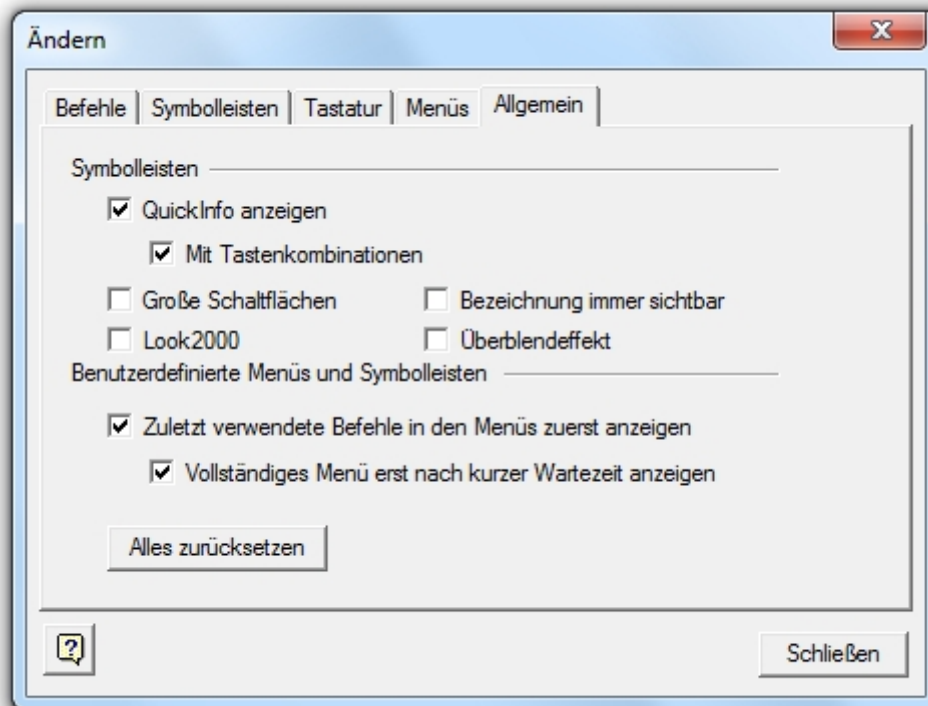
Menübefehl "**Format/Einstellungen...**":

- **geteilte Ansichten unterstützen:** Ist diese Option markiert (✓), können gleichzeitig bis zu vier Seiten im Fenster angezeigt werden. Fassen Sie dazu den in der horizontalen bzw. vertikalen Scrollbarleiste vorhandenen Seitenteiler mit der Maus an und schieben ihn zur gewünschten Position. Diese Option wird erst nach einem Neustart des Programms wirksam.



- **Automatischer Abstand (vertikal):** Dieser Abstand bezieht sich auf den vertikalen Abstand der einzelnen Objekte, wenn sie vom Programm generiert werden. Eine Änderung dieses Wertes wirkt sich erst bei der Generierung eines neuen Dokuments aus.

Außerdem können Sie unter dem Menüpunkt "**Extras/Anpassen**" - analog den Office-Programmen - das Erscheinungsbild der Menüs und Schaltflächen ganz individuell anpassen.



**Abb. 5.21** Im "Extras"-Menü lassen sich Symbolleisten etc. ändern

#### 5.4.5 Ein individuelles Template

**ISOMAG** arbeitet mit **nur einem** vordefinierten Template. Dieses Template muss unter dem Namen ISOMAG.DDS im Datenbankverzeichnis (Standard: "C:\Programme\Isomag\Databases") gespeichert sein. Wenn Sie also ein individuelles Template benutzen möchten, muss die Datei ISOMAG.DDS editiert werden. Dazu ist wie folgt vorzugehen:

1. Erzeugen Sie eine Sicherheitskopie der Datei.
2. Starten Sie den Druck-Designer im Administrator-Mode mit dem Befehl "Start/Ausführen..." Geben Sie im Feld "Öffnen" Folgendes ein:

C:\Programme\Isomag\PrintDesigner.exe /a

3. Klicken Sie auf OK. Der Druck-Designer wird wie gewohnt, jedoch ohne Template, gestartet. Der Unterschied besteht darin, dass Sie jetzt die Attribute aller Objekte (vgl. Abschnitt **5.4.3**) ändern können.
4. Laden Sie das zu ändernde Template mit "Datei/Öffnen" und Auswahl von ISOMAG.DDS im Datenbankverzeichnis (s. o.). Sie können auch ein neues Template mit "Datei/Neu" erzeugen.
5. Gestalten Sie das Template nach Ihren Vorstellungen. Dabei können alle beschriebenen Objekte und Manipulationen zum Einsatz kommen.

Speichern Sie das fertige Template mit "Datei/Speichern" bzw. "Speichern unter..." als ISOMAG.DDS im Datenbankverzeichnis. Die vorhandene Datei muss überschrieben werden. Sie haben ja eine Sicherheitskopie für alle Fälle.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Großmann, K.; Schreiber, U.; Uhlig, A.; Ilschner, M.: Optimale Schwingungsisolierung von Maschinen und Baugruppen in Gebäuden und Anlagen mittels problemorientierter anwenderfreundlicher Software. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 769, Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Dortmund/Berlin 1997
- [2] Richtlinie VDI 2062: Schwingungsisolierung, Blatt 1: Begriffe und Methoden. VDI-Gesellschaft Konstruktion und Entwicklung, Fachbereich Schwingungstechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf 1976
- [3] Richtlinie VDI 2056: Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen. VDI-Gesellschaft Konstruktion und Entwicklung, Fachbereich Schwingungstechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf 1964
- [4] Richtlinie VDI 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Blatt 1 und 2. VDI-Gesellschaft Konstruktion und Entwicklung, Fachbereich Schwingungstechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf 1987
- [5] Jörn, Raoul; Lang, Georg: Schwingungsisolierung mittels Gummifederelementen. Fortschritt-Berichte VDI Zeitschrift, Reihe 11, Nr. 6, VDI-Verlag, Düsseldorf 1968
- [6] Kempe, Volker: Dynamische Berechnung von Blocksystemen. In: Leichtbauhandbuch Band 6/1: CAD-Software AUTRA-M8, Institut für ökonomische Verwendung von Werkstoffen, Dresden 1987
- [7] Holzweißig, Franz; Dresig, Hans: Lehrbuch der Maschinendynamik. Fachbuchverlag Leipzig-Köln, Leipzig 1992
- [8] Fronius, S.; Holzweißig, F. (Hrsg.): Taschenbuch Maschinenbau, Band 2. Verlag Technik, Berlin 1985
- [9] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.): Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1995
- [10] Koch, Heinz: Beitrag zur Dynamik der Blockfundamente und zur Schwingungsberechnung von Systemen mit mehreren Freiheitsgraden. TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1975
- [11] Großman, Knut: Ein Beitrag zur Modellfindung und -berechnung für die dynamische Analyse von Werkzeugmaschinen-Strukturen. TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1974
- [12] Laschet, Andreas: Simulation von Antriebssystemen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1988

- [13] Großman, Knut: Dynamische Verhaltensanalyse von spanenden Werkzeugmaschinen. TU Dresden, Habilitation, 1991
- [14] Melzig-Thiel, R.; Kinne, J.; Seidel, E.: Vorschriften und Normen für mechanische Schwingungen von Maschinen und an Arbeitsplätzen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund 1995
- [15] Deutsche Norm DIN 1311: Schwingungen, Teil 1: Schwingungsfähige Systeme - Begriffe, Einteilung. DIN Deutsches Institut für Normung, Entwurf, Berlin 1994
- [16] Deutsche Norm DIN 1311: Schwingungen, Teil 3: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit endlich vielen Freiheitsgraden. DIN Deutsches Institut für Normung, Entwurf, Berlin 1994
- [17] Deutsche Norm DIN 4024: Maschinenfundamente, Teil 2: Steife (starre) Stützkonstruktionen für Maschinen mit periodischer Erregung. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin 1988
- [18] Europäische Norm prEN 1299: Mechanische Schwingungen und Stöße - Schwingungsisolierung von Maschinen - Angaben für den Einsatz von Quellenisolierungen. Technisches Komitee CEN/TC 231, Entwurf, 1995
- [19] Firmenschrift: GERB Schwingungsisolierungen. GERB, Berlin, 9. Auflage 1992
- [20] Firmenschrift: PHOENIX METALLGUMMI.
- [21] Firmenschrift: Schwingungsisolierung. LBF INDUSTRIETECHNIK, Lauterbach
- [22] Firmenschrift: Standard-Bauelemente für die Schwingungsisolierung. Freudenberg-Megulastik, Weinheim
- [23] Firmenschrift: ContiTechnik Schwingmetall. Continental Gummi-Werke, Hannover 1987
- [24] [Gellert, W.; Küstner, H.; Hellwich, M.; Kästner, H. (Hrsg.): Kleine Enzyklopädie Mathematik. VEB Bibliographisches Institut, Leipzig, 9. gekürzte Auflage 1974
- [25] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig und Verlag Nauka, Moskau 1979
- [26] Engeln-Müllges, G.; Reutter, F.: Numerik-Algorithmen: Entscheidungshilfe zur Auswahl und Nutzung. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- [27] Werner, D.: Baudynamik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1989

- [28]** Korenev, B. G.; Rabinovič, I. M.: Baudynamik, Handbuch. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1980
- [29]** Woo, M.; Neider, J.; Davis T.: OpenGL Programming Guide. Second Edition, Silicon Graphics, Inc., Addison-Wesley Developers Press 1997
- [30]** Bachmann, H.: Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1995

## Verzeichnis der Abbildungen

	Seite	
Abb. 1.1	Einordnung der Schwingungsisolierung in den Schwingungsschutz	13
Abb. 2.1	Minimalmodelle für die Schwingungsisolierung, Einmassenschwinger a) Krafterregung für die Schwingungsisolierung von Maschinen b) Weg- bzw. Stützerregung für die Schwingungsisolierung von Geräten	16
Abb. 2.2	Die Vergrößerungsfunktion in Abhängigkeit von Frequenzverhältnis und Dämpfung	20
Abb. 2.3	Minimalmodelle für die doppelte Schwingungsisolierung, Zweimassenschwinger a) Krafterregung für die Schwingungsisolierung von Maschinen b) Weg- bzw. Stützerregung für die Schwingungsisolierung von Geräten	21
Abb. 2.4	Eigenfrequenzen des gefesselten Zweimassenschwingers, bezogen auf Frequenz und Parameter des Einmassenschwingers	23
Abb. 2.5	Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers im Vergleich zum Einmassenschwinger für tiefe Abstimmung	25
Abb. 2.7	Vergrößerungsfunktion des Zweimassenschwingers im Vergleich zum Einmassenschwinger für gemischte Abstimmung	27
Abb. 2.8	Modell des elastisch gelagerten Blockfundamentes, mit starrer Kopplung Maschine - Fundament und 6 Freiheitsgraden	28
Abb. 2.9	Elastisch gelagerte Maschine auf elastisch gelagertem Fundament, Modell mit 2 Starrkörpern und 12 Freiheitsgraden	30
Abb. 2.10	Erste Schwingform eines beidseitig gelenkig gelagerten Balkens	31
Abb. 2.11	Beidseitig eingespannter Balken	34
Abb. 2.12	Allseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte	35
Abb. 2.13	Allseitig eingespannte Rechteckplatte	36
Abb. 2.14	Eingespannte bzw. gelenkig gelagerte Rechteckplatte	37
Abb. 2.15	Elastisch gelagerte Maschine auf elastisch gelagertem Fundament mit elastischem Aufstellort, Modell mit 2 Starrkörpern, einer Masse und 13 Freiheitsgraden	38
Abb. 2.16	Verteilte Steifigkeit $c_z(x, y)$	39
Abb. 3.1	Globales Koordinatensystem	44
Abb. 3.2	Koordinatensysteme für Maschine und Fundament	44
Abb. 3.3	Schwerpunktkoordinatensystem	45
Abb. 3.4	Elementkoordinatensystem	45
Abb. 3.5	Bezugskoordinatensystem	46
Abb. 3.6	Aufstellung der Steifigkeitsmatrix für die dynamische Rechnung	56
Abb. 3.7	Die Struktur der Datenbank der Schwingungsisolatoren	71
Abb. 4.1	Kraft-Weg Kennlinie mit Tangente im Arbeitspunkt	76
Abb. 4.2	Die komplette ISOMAG-Programmoberfläche	80
Abb. 4.3	Objekt-Hierarchie	81
Abb. 4.4	Dialog-Fenster für das Duplizieren von Objekten	86
Abb. 4.5	Maßeinheiten	88
Abb. 4.6	Projekteigenschaften	88
Abb. 4.7	Grundeinstellungen	89
Abb. 4.8	Objektleiste	91
Abb. 4.9	Beispiel für ein Label	91
Abb. 4.10	Allgemeiner Parameterdialog	93

Abb. 4.11	Dialog zur Bestimmung der Lage eines Körpers	94
Abb. 4.12	Dialog zur Bestimmung der Abmessungen eines Körpers	95
Abb. 4.13	Aktionsmenü für Undo/Redo	98
Abb. 4.14	Parameterdialog zur Beschreibung der Trägheit von Körpern	100
Abb. 4.15	Anzeige der aktuellen Trägheitswerte für den Teilkörper	101
Abb. 4.16	Vollständige Trägheitseigenschaften	102
Abb. 4.17	Definition des Querschnitts für ein freies Prisma	103
Abb. 4.18	Informationen zu einer importierten CAD Datei	104
Abb. 4.19	Listbox zur Auswahl des Isolatorentyps	106
Abb. 4.20	Beispiel für einen aus der Datenbank ausgewählten Isolator	107
Abb. 4.21	Parameterdialog zur Ermittlung der Steife von Isolatoren	108
Abb. 4.22	Parameterdialog zur Eingabe der Dämpfung am Beispiel des Isolatoren-Typs "3D Komplett"	109
Abb. 4.23	Dialog zur Eingabe von Grenzwerten am Beispiel des Isolatoren-Typs "3D Komplett"	110
Abb. 4.24	Tabelle mit Position und Steifigkeiten der Isolatoren eines Modells	111
Abb. 4.25	Dialog zur Beschreibung der Umgebung	112
Abb. 4.26	Dialog zur Beschreibung von Kraft-, Momenten- und Stützerregungen	113
Abb. 4.27	Parameterdialog zur Beschreibung einer Unwucherregung	115
Abb. 4.28	Dialog Berechnung – Einstellungen	116
Abb. 4.29	Assistent für einfache Schwingungsisolierung	118
Abb. 4.30	Assistent für doppelte Schwingungsisolierung bei noch nicht existierendem Fundament	120
Abb. 4.31	Assistent für doppelte Schwingungsisolierung bei schon existierendem Fundament (1)	121
Abb. 4.32	Assistent für doppelte Schwingungsisolierung bei schon existierendem Fundament (2)	122
Abb. 4.33	Ergebnisfenster zur Anzeige der Hauptträgheiten	123
Abb. 4.34	Ergebnisfenster zur Anzeige der Hauptsteifigkeiten	124
Abb. 4.35	Ergebnisdialog zur Anzeige von statischen Ergebnissen eines beliebigen Punktes	126
Abb. 4.36	Ergebnisdialog zur Anzeige der Eigenfrequenzen und Eigenwerte/Schwingformen	127
Abb. 4.37	Darstellung dynamischer Ergebnisse über der Zeit	128
Abb. 4.38	Darstellung eines Verformungsverlaufes über der Zeit	128
Abb. 4.39	Darstellung dynamischer Ergebnisse über der Frequenz	129
Abb. 4.40	Prüfung auf Einhaltung des Isolationsgrades	131
Abb. 4.41	Dialog der Einstellungen für die Animation	132
Abb. 4.42	Videoexporteinstellungen. Links: Betriebsschwingung, rechts: Eigenschwingform	134
Abb. 5.1	Dialog der Datenbankanbindung zur Katalogauswahl	137
Abb. 5.2	Schema für die Auswertung der Bedingungstabelle	138
Abb. 5.3	Eingabebedingungen	138
Abb. 5.4	Treppenfunktion	140
Abb. 5.5	Lineare Interpolation	140
Abb. 5.6	Spline-Interpolation	141
Abb. 5.7	Keine Sonderbehandlung	141
Abb. 5.8	Spiegelung	142
Abb. 5.9	Periode	142

Abb. 5.10	Ergebnisfenster-Überblick	144
Abb. 5.11	Dialog Eigenschaften, Registerseite Fenster	148
Abb. 5.12	Dialog Eigenschaften, Registerkarte Y-Achse	149
Abb. 5.13	Dialog Eigenschaften, Registerkarte Darstellung	151
Abb. 5.14	Registerkarte "Hilfslinien" im Eigenschaftsdialog	152
Abb. 5.15	Ergebnisfenster mit aktiviertem Ausmessfenster	154
Abb. 5.16	Prinzipieller Aufbau des Ausgabeprotokolls	156
Abb. 5.17	Explorer	158
Abb. 5.18	Objektattribute	160
Abb. 5.19	Verschiebung eines Objekts	161
Abb. 5.20	Dialog Kopf- und Fußzeile	163
Abb. 5.21	Im "Extras"-Menü lassen sich Symbolleisten etc. ändern	164
Abb. 7.1	Aufstellung der Steifigkeitsmatrizen, Berechnung der statischen Kräfte und Verformungen	176
Abb. 7.2	Test auf Einhaltung der statischen Grenzwerte	177
Abb. 7.3	Aufstellung der Dämpfungsmatrizen	178
Abb. 7.4	Prinzipieller Programmablauf, Teil 1	179
Abb. 7.5	Prinzipieller Programmablauf, Teil 2	180
Abb. 7.6	Prinzipieller Programmablauf Doppelte Schwingungsisolierung Teil 1	181
Abb. 7.7	Prinzipieller Programmablauf Doppelte Schwingungsisolierung Teil 2	182
Abb. 7.8	Modell einer schwingungsisoliert aufgestellten Zentrifuge in ISOMAG	190
Abb. 7.9	Parameterdialog zur Beschreibung von quaderförmigen Grundkörpern	190
Abb. 7.10	Parameterdialog zur Beschreibung von zylindrischen Grundkörpern	191
Abb. 7.11	Hauptträgheiten des Systems Maschine	193
Abb. 7.12	Assistent Einfache Schwingungsisolierung	194
Abb. 7.13	Suche in der Isolatoren-Datenbank	194
Abb. 7.14	Gleichzeitige Ausrichtung von mehreren Isolatoren	195
Abb. 7.15	Ergebnisse der Nachrechnung (Auswahl)	196
Abb. 7.16	Arbeitsblatt Beispiel Ventilator.isg	197
Abb. 7.17	Ergebnisse des Beispiels Ventilator.isg	199
Abb. 7.18	Arbeitsblatt Beispiel Ventilator 2.isg	200
Abb. 7.19	Ventilator 2.isg: Vergrößerungsfunktion der z-Verschiebung Pkt. A	201
Abb. 7.20	Arbeitsblatt Beispiel Baugrund.isg	202
Abb. 7.21	Ergebnisse des Beispiels Baugrund.isg	204

## Verzeichnis der Tabellen

	Seite	
Tab. 4.1	Übersicht über alle ISOMAG-Modellobjekte	82
Tab. 4.2	Objekte, die Ergebnisse der Systemberechnung liefern	84
Tab. 4.3	Objekte für Zusatzinformationen	84
Tab. 4.4	Die Tabelle zeigt das Verhalten der Bedienelemente bei Mehrfachparametrierung	95
Tab. 5.1	Schlüsselwörter zur Kurvenbeschriftung	153
Tab. 7.1	Berechnung der Trägheitseigenschaften der Grundkörper in Elementkoordinaten	183
Tab. 7.2	Menübefehle	184
Tab. 7.3	Schaltflächen	187

## 7 Anhang

### 7.1 Syntax für alphanumerische Eingaben

#### 7.1.1 Erläuterung zur Notation

Die Regeln zur Bildung von mathematischen Ausdrücken werden in einer erweiterten Backus-Naur-Form notiert. Jede Regel besteht aus dem zu definierenden syntaktischen Element (Nichtterminal) auf der linken Seite, dem Definitionszeichen und einer Folge von Elementen (Nichtterminalen, Terminalen und speziellen Zeichen) auf der rechten Seite. Folgende spezielle Zeichen werden benutzt:

<...>	Nichtterminal
::=	Definitionszeichen
{ ... }	Folge von Elementen, die auch leer sein kann
[ ... ]	wahlweise einzugeben, kann entfallen
	Alternative
cos	Terminal, einzugebende Zeichen
A .. Z	Zeichen von A bis Z

Bei der Interpretation der Regeln werden die Nichtterminale der rechten Seite durch deren Definition ersetzt. Terminale sind als Zeichenkette einzugeben. Man beachte Groß- und Kleinschreibung.



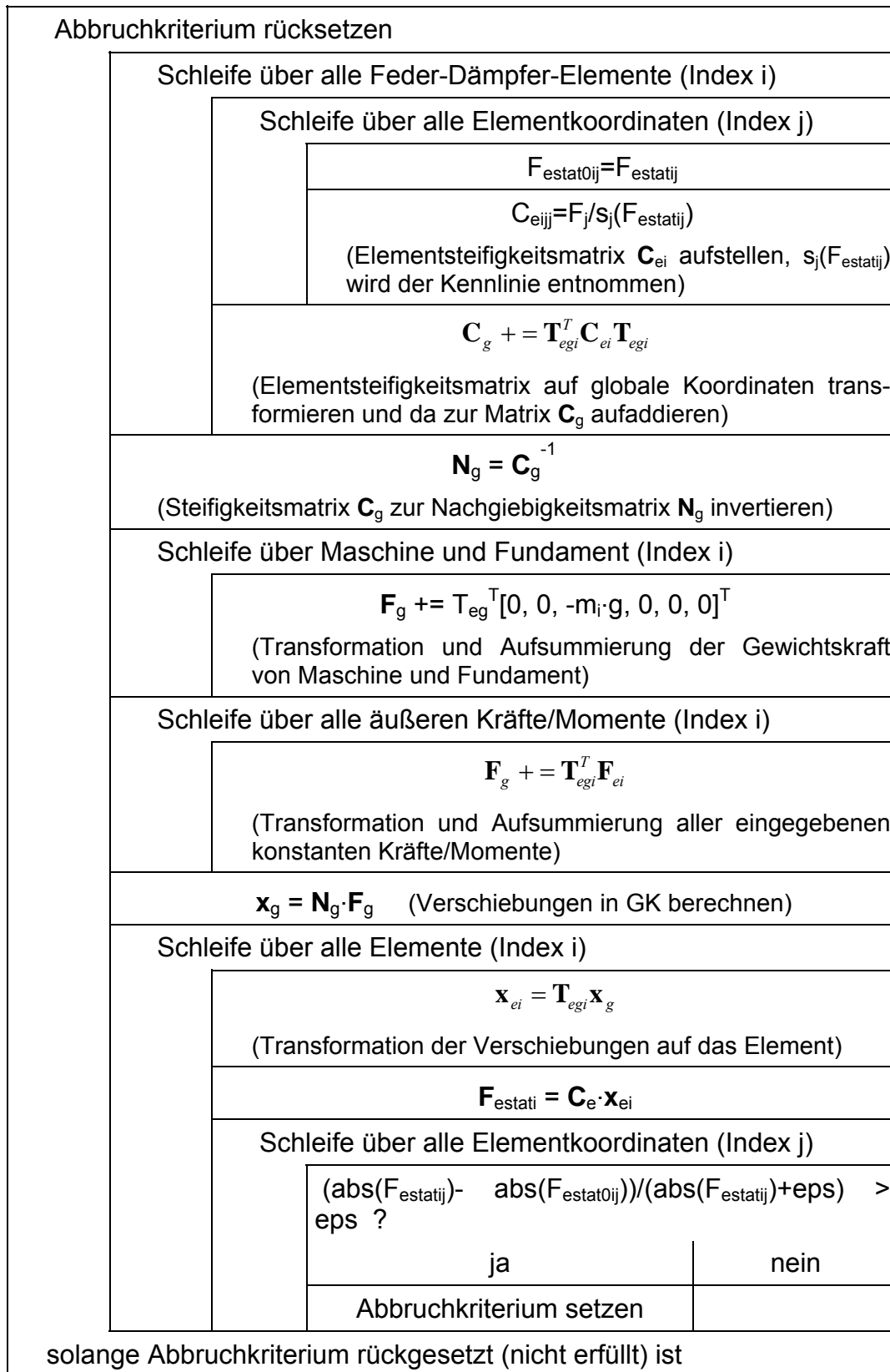
### 7.1.2 Mathematische Ausdrücke

<Ausdruck>	::= <Produkt> { [ +   - ] <Produkt> }
<Produkt>	::= <Potenz> { [ *   / ] <Potenz> }
<Potenz>	::= <VorzFaktor> [ ^ <VorzFaktor> ]
<VorzFaktor>	::= [ +   - ] <Faktor>
<Faktor>	::= ( <Ausdruck> )   <Funktion> ( <Argumente> )   <Zahl>   <Variablenbezeichner>   e   pi
<Funktion>	::= ln   exp   sinh   cosh   tanh   sin   cos   tan   sqrt   abs   int   sign   not   arcsin   arccos   arctan   arctan2   rad   deg
<Argumente>	::= <Ausdruck> { , <Ausdruck> }
<Variablenbezeichner>	::= <Buchstabe> { <Buchstabe>   <Ziffer>   <Sonderzeichen> }
<Zahl>	::= <Ziffer> { <Ziffer> } [ . <Ziffer> { <Ziffer> } ] [ e   E [ +   - ] <Ziffer> { <Ziffer> } ]
<Ziffer>	::= 0 .. 9
<Buchstabe>	::= A .. Z   a .. z
<Sonderzeichen>	::= .   _

### 7.1.3 Beispiele

12.9	Zahl
3+8	Ausdruck
pi	3.14..., $\pi$
3.0*6^3	Ausdruck
2.0*sin(pi/3)	Ausdruck
6.8*arctan2(0.8,-0.72)	Funktion mit zwei Argumenten

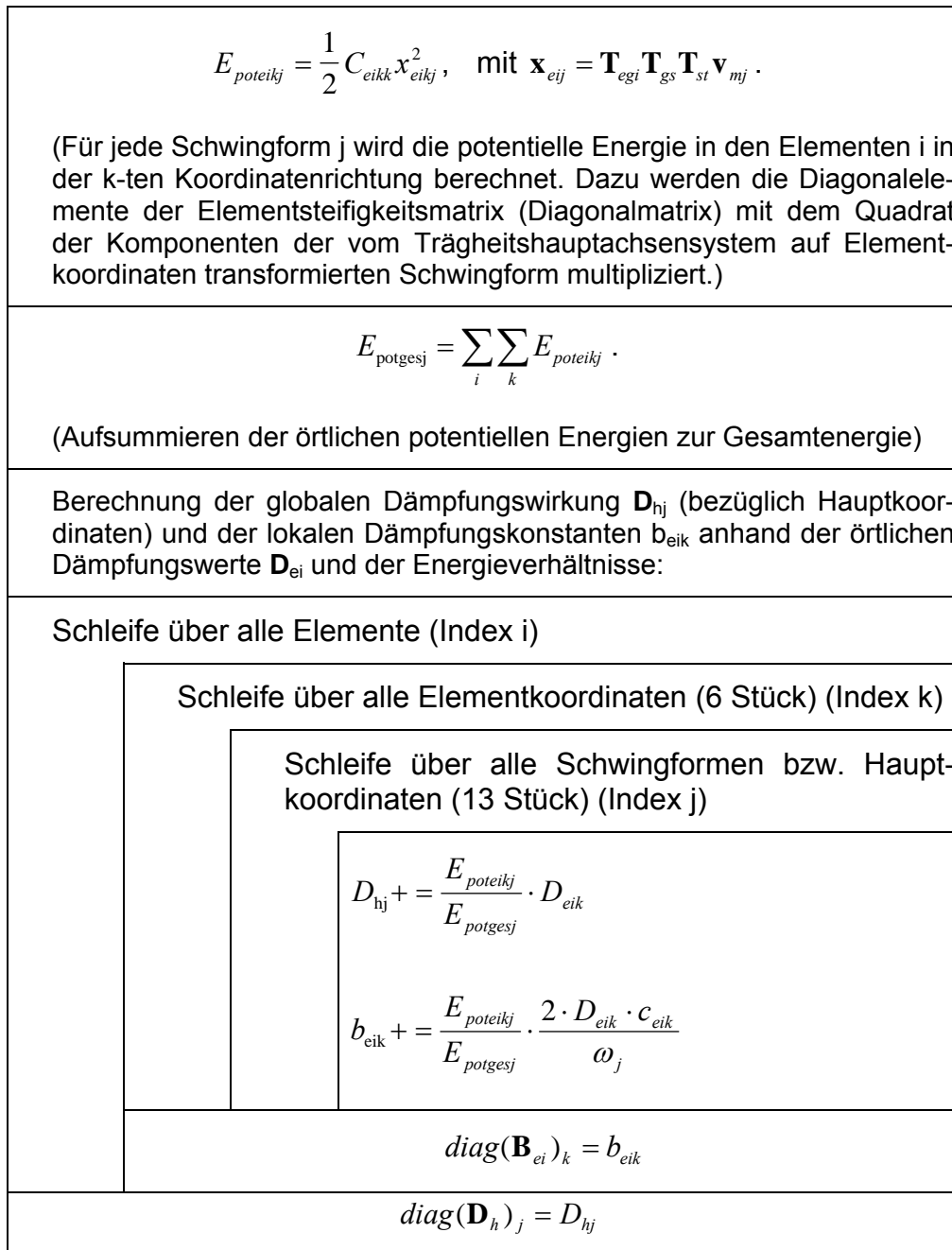
## 7.2 Abbildungen



**Abb. 7.1** Aufstellung der Steifigkeitsmatrizen, Berechnung der statischen Kräfte und Verformungen

Schleife über alle Elemente (Index i)	
Schleife über alle Koordinaten des Federtyps (Index j)	
$F_{zulmin}(i,j) = 0 \text{ and } F_{zulmax}(j) = 0 \text{ ?}$	
ja	nein
next j	
$-F_{estat}(i,j) < F_{zulmin}(i,j) \text{ ?}$	
ja	nein
Mitteilung	
$-F_{estat}(i,j) > F_{zulmax}(i,j) \text{ ?}$	
ja	nein
Mitteilung	
Schleife über alle Koordinaten des Federtyps (Index j)	
$s_{zulmin}(i,j) = 0 \text{ and } s_{zulmax}(j) = 0 \text{ ?}$	
ja	nein
next j	
$-x_e(i,j) < s_{zulmin}(i,j) \text{ ?}$	
ja	nein
Mitteilung	
$-x_e(i,j) > s_{zulmax}(i,j) \text{ ?}$	
ja	nein
Mitteilung	

**Abb. 7.2** Test auf Einhaltung der statischen Grenzwerte



**Abb. 7.3** Aufstellung der Dämpfungsmatrizen

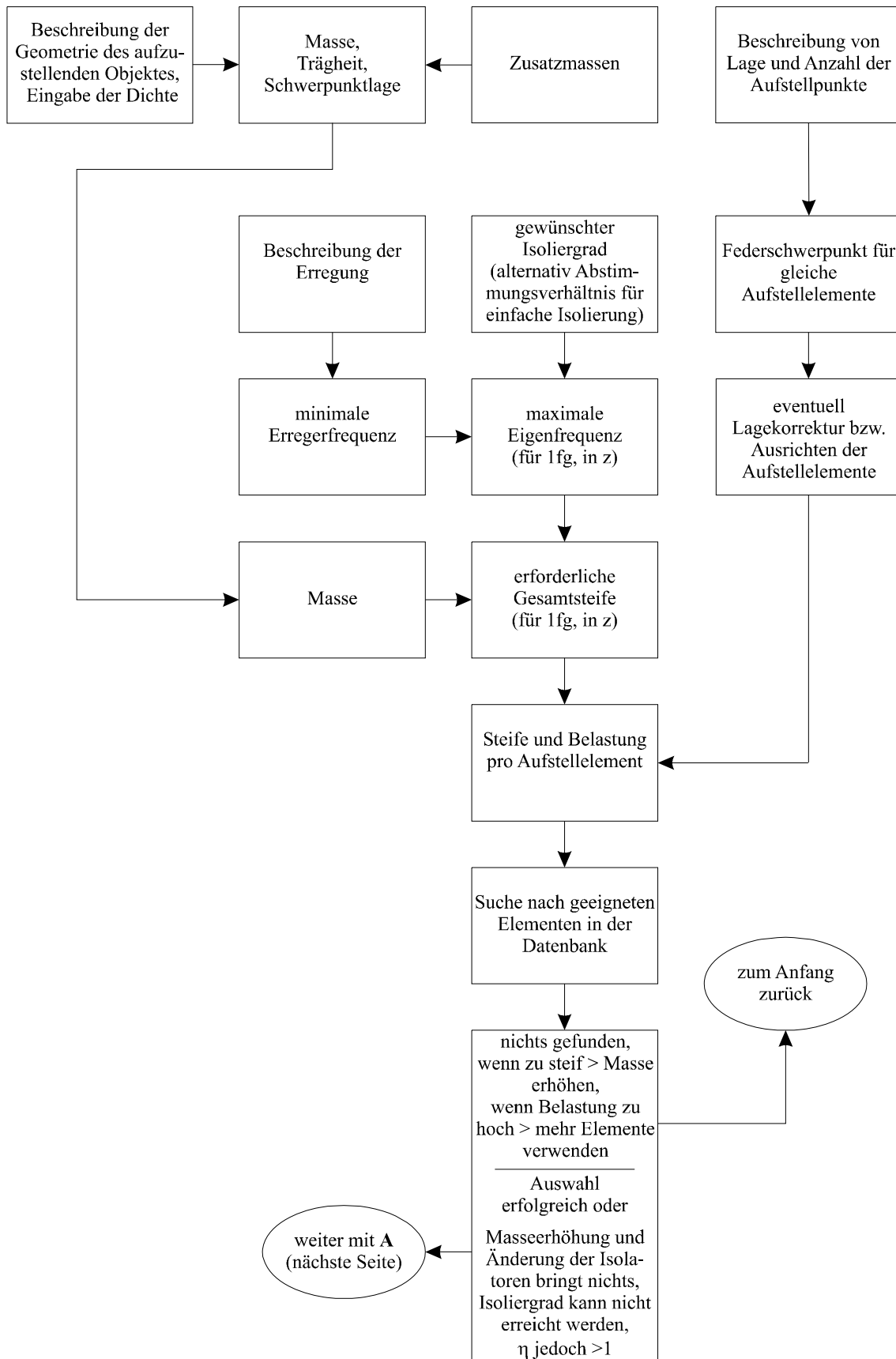


Abb. 7.4 Prinzipieller Programmablauf, Teil 1

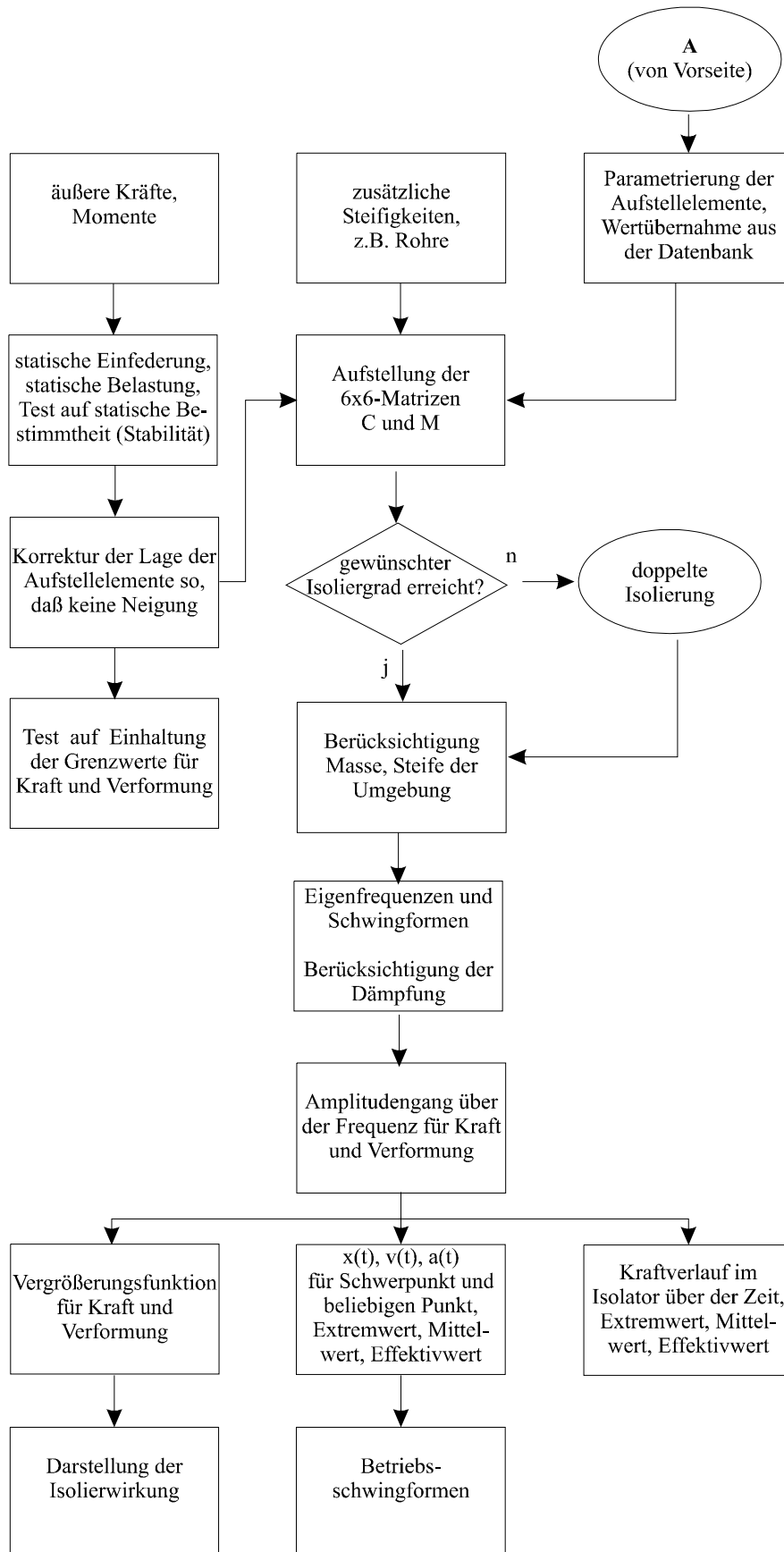
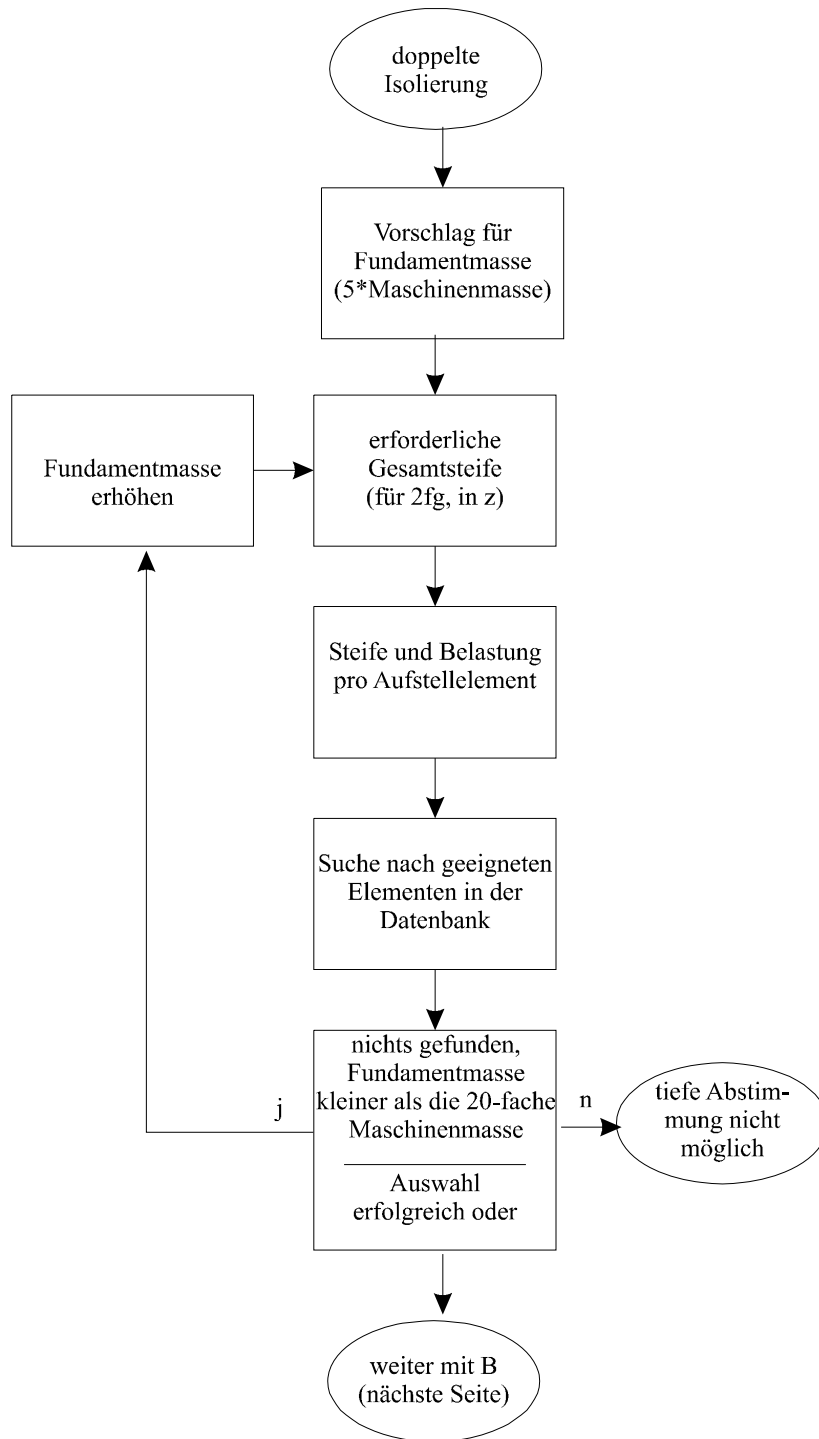
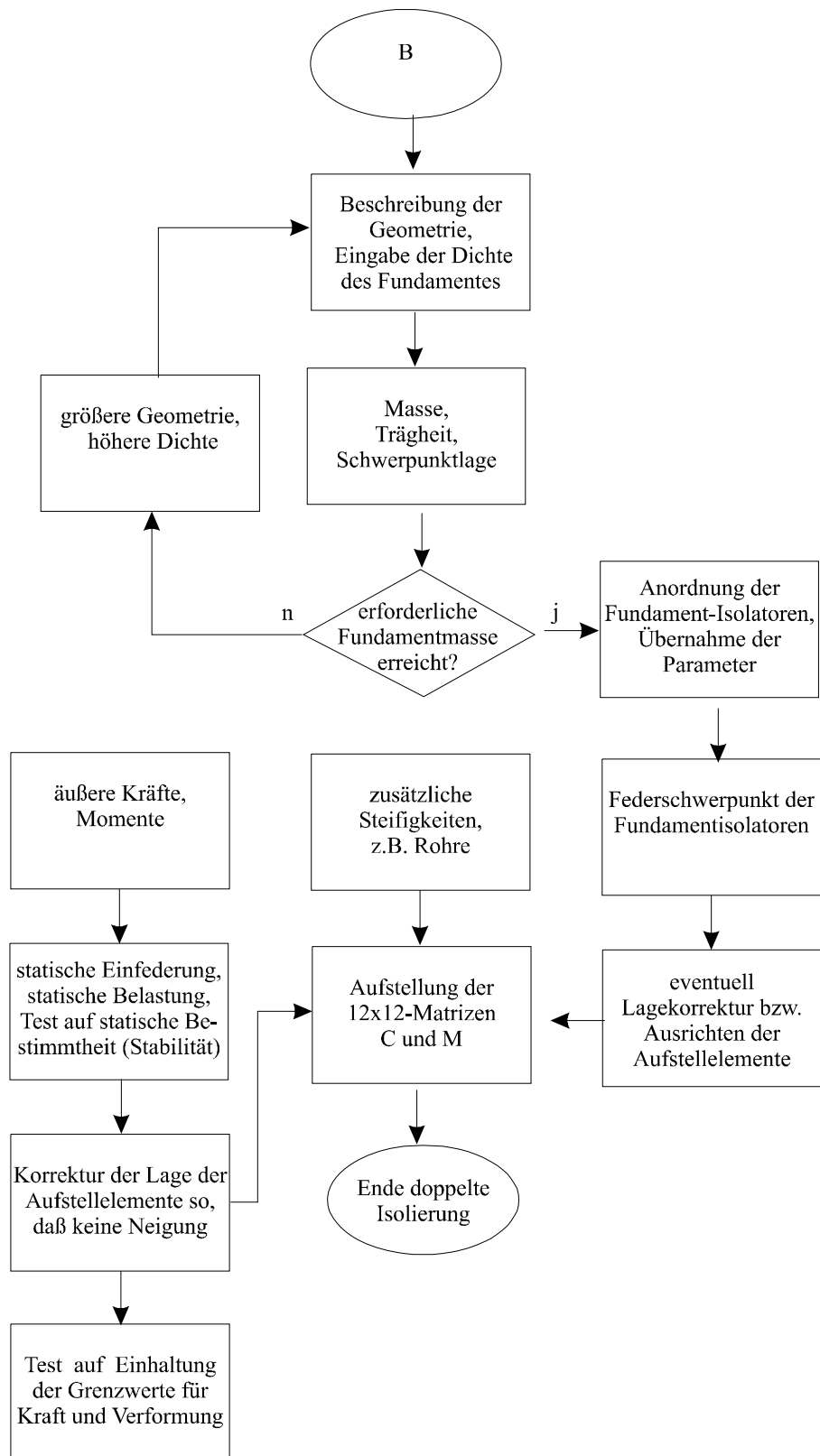


Abb. 7.5 Prinzipieller Programmablauf, Teil 2



**Abb. 7.6** Prinzipieller Programmablauf  
Doppelte Schwingungsisolierung Teil 1



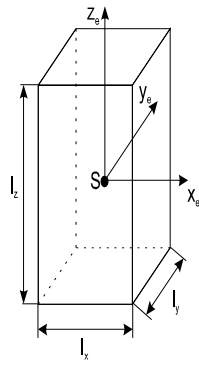
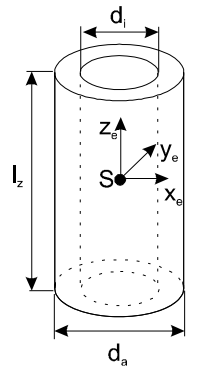
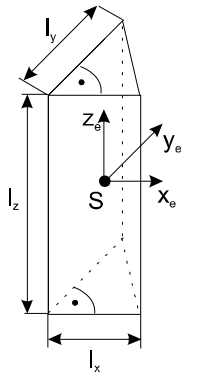
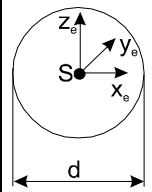


**Abb. 7.7** Prinzipieller Programmablauf  
Doppelte Schwingungsisolierung Teil 2

## 7.3 Tabellen

### 7.3.1 Trägheitseigenschaften der Grundkörper






**Tab. 7.1** Berechnung der Trägheitseigenschaften der Grundkörper in Elementkoordinaten

Grundkörper	Quader	Zylinder	Dreikant	Kugel
Skizze				
$m_e =$	$ff \cdot \rho \cdot l_x \cdot l_y \cdot l_z$	$ff \cdot \rho \cdot l_z \cdot \frac{\pi}{4} (d_a^2 - d_i^2)$	$\frac{1}{2} \cdot ff \cdot \rho \cdot l_x \cdot l_y \cdot l_z$	$\frac{1}{6} \cdot ff \cdot \rho \cdot d^3$
$J_{exx} =$	$\frac{m_e}{12} \cdot (l_y^2 + l_z^2)$	$\frac{m_e}{4} \cdot \left[ \frac{l_z^2}{3} + \frac{1}{4} (d_a^2 + d_i^2) \right]$	$\frac{m_e}{6} \cdot \left( \frac{l_z^2}{2} + \frac{l_y^2}{3} \right)$	$\frac{1}{10} \cdot m_e \cdot d^2$
$J_{eyy} =$	$\frac{m_e}{12} \cdot (l_x^2 + l_z^2)$	$\frac{m_e}{4} \cdot \left[ \frac{l_z^2}{3} + \frac{1}{4} (d_a^2 + d_i^2) \right]$	$\frac{m_e}{6} \cdot \left( \frac{l_z^2}{2} + \frac{l_x^2}{3} \right)$	$\frac{1}{10} \cdot m_e \cdot d^2$
$J_{ezz} =$	$\frac{m_e}{12} \cdot (l_y^2 + l_x^2)$	$\frac{m_e}{8} (d_a^2 + d_i^2)$	$\frac{m_e}{18} (l_x^2 + l_y^2)$	$\frac{1}{10} \cdot m_e \cdot d^2$
$J_{exy} = J_{eyx} =$	0	0	$\frac{m_e \cdot l_x \cdot l_y}{36}$	0



### 7.3.2 Menübefehle

Das Programmfenster enthält das Hauptmenü. Nachfolgende Tabelle erklärt die einzelnen Menüfunktionen.

**Tab. 7.2** Menübefehle

Menübefehl	Schaltfläche/ Kurtztaste	Aktion
"Datei"/ "Neu"	 Strg+N	Legt ein neues Projekt an
"Datei"/ "Öffnen"	 Strg+O	Der Windows-Standarddialog zum Laden einer Datei wird geöffnet. Die <b>ISOMAG</b> -Projekte im ausgewählten Verzeichnis werden angezeigt. Wählen Sie das zu bearbeitende Projekt aus.
"Datei"/ "Schließen"		Das aktuelle Projekt wird geschlossen. Haben Sie nach der letzten Speicherung Änderungen vorgenommen, so werden Sie vor dem Schließen darauf hingewiesen (Änderungen in ... speichern?).
"Datei"/ "Speichern"	 Strg+S	Das aktuelle Projekt wird unter seinem Dateinamen gespeichert. Wurde noch kein Name vergeben, wird der Windows-Standarddialog zum Speichern einer Datei geöffnet (s. "Speichern unter...")
"Datei"/ "Speichern unter..."		Der Windows-Standarddialog zum Speichern einer Datei wird geöffnet. Wählen Sie Verzeichnis und Dateiname, unter dem das aktuelle <b>ISOMAG</b> -Projekt gespeichert werden soll.
"Datei"/ "Drucken..."	 Strg+P	Dieser Befehl startet das Programm "Druck-Designer" und generiert den Protokollausdruck im Hintergrund. Anschließend wird der Standarddialog "Drucken" geöffnet.
"Datei"/ "Seitenansicht"		Dieser Befehl startet das Programm "Druck-Designer" und generiert den Protokollausdruck.
"Datei"/ "Druckereinrichtung"		Öffnet den Standarddialog "Drucken" des Druck-Designers.
"Datei"/ "Beenden"		Die Auswahl dieses Menüpunktes beendet das Programm. Zuvor wird der Anwender nach evtl. zu speichernden Projekten gefragt.
"Bearbeiten"/ "Ausschneiden"	 Strg+X	Markierte Objekte werden aus der Struktur ausgeschnitten und in die Zwischenablage kopiert.







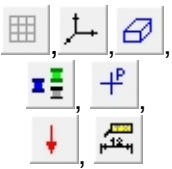





Menübefehl	Schaltfläche/ Kurtztaste	Aktion
"Bearbeiten"/ "Kopieren"	 Strg+C	Markierte Objekte werden in die Zwischenablage kopiert.
"Bearbeiten"/ "Einfügen"	 Strg+V	Dieser Befehl ist nur aktiv, wenn <b>ISOMAG</b> -Objekte in der Zwischenablage sind. Von dort werden die Objekte in der aktuellen Ansicht eingefügt.
"Bearbeiten"/ "Löschen"	Entf	Markierte Objekte werden gelöscht.
"Bearbeiten"/ "Eigenschaften..."	Enter	Öffnet den Parameterdialog.
"Bearbeiten"/ "Duplizieren..."	Strg+D	Öffnet den Dialog zum Duplizieren der/des markierten Objekte(s).
"Bearbeiten"/ "Isolatorentabelle..."		Bringt die Isolatorentabelle zur Ansicht.
"Bearbeiten"/ "Label"		Erzeugt oder löscht ein Label für das/die markierte(n) Objekt(e).
"Bearbeiten"/ "Ansicht in die Zwischenablage"		Erzeugt ein Bitmap der 3D-Ansichten(en) und kopiert es in die Zwischenablage.
"Berechnung"/ "Einstellungen..."		Öffnet den Dialog zur Einstellung der Berechnungseigenschaften.
"Berechnung"/ "Assistenten"		Öffnet den jeweiligen Assistenten zur einfachen bzw. doppelten Schwingungsisolierung.
"Berechnung"/ "Automatisch neu berechnen"		Schaltet die automatische Neuberechnung an bzw. aus.
"Ergebnisse"/ "Hauptträgheiten", "Steifigkeiten", "Eigenfrequenzen...", "Maximale Bodelbelastung"		Öffnet den entsprechenden Ergebnisdialog.
"Ergebnisse"/ "Animation"		Startet bzw. beendet die Animation.
"Ansicht"/ "Eine Ansicht" "Vier Ansichten"		Schaltet den entsprechenden Modus ein.








Menübefehl	Schaltfläche/ Kurzta- ste	Aktion
		
"Ansicht"/ "Ausrichten"		Richtet die 2D-Ansichten zueinander aus und führt "Zoom Alles" für die 3D-Ansicht aus.
"Ansicht"/ "Statusleiste"		Blendet die Statusleiste ein bzw. aus.
"Extras"/ "Maßeinheiten..."		Öffnet den Dialog zur Einstellung der Maßeinheiten.
"Extras"/ "Projekteinstellungen..."		Öffnet den Parameterdialog des Projektes.
"Extras"/ "Grundeinstellungen..."		Der Dialog mit den Grundeinstellungen des Programms wird geöffnet.
"Extras"/ "Standartwerte Isolatoren..."		Öffnet den Dialog zur Änderung der Defaultwerte für neue Isolatoren.
"Fenster"/ "Neues Fenster"		Der Befehl öffnet ein neues Projektfenster.
"Fenster"/ "Überlappend"		Dieser Befehl ordnet die Projektfenster so, dass alle Titelleisten sichtbar sind.
"Fenster"/ "Nebeneinander"		Der Befehl ordnet die Projektfenster so, dass alle Fenster vollständig sichtbar sind.

### 7.3.3 Schaltflächen

Die folgende Tabelle erklärt Schaltflächen, die keinen Menübefehlen entsprechen:

**Tab. 7.3** Schaltflächen

Schaltfläche	Aktion
	Macht die zuletzt durchgeführte Aktion rückgängig.
	Stellt eine zuvor rückgängig gemachte Aktion wieder her.
	Markieren und verschieben. In diesem Zeigermodus können Objekte markiert und verschoben werden. Parameterdialoge können geöffnet werden. Die "gerastete" Schaltfläche signalisiert diesen Modus.
	Markieren und drehen. In diesem Rotationsmodus können Objekte markiert und gedreht werden. Die "gerastete" Schaltfläche signalisiert diesen Modus.
	Ist diese Schaltfläche eingerastet, berechnet ISOMAG die statischen Verformungen. Das Nichtberechnen ist insbesondere bei Anlagen mit automatischer Niveauregulierung sinnvoll.
	Blendet die Ergebniskoordinatensysteme für die Hauptträgheiten und Hauptsteifigkeiten aus.
	Erlaubt bzw. verbietet das Markieren von Koordinatensystemen, Umgebung, Körpern, Isolatoren, Punkten, Erregungen, Maßen und Labels.
	Ist die Schaltfläche "Parameterdialog" aktiviert, wird dieser automatisch geöffnet, wenn man ein neues Objekt auf das Arbeitsblatt legt.
 bzw. R	Schaltet in den Modus "Ansicht drehen".
 bzw. X	Schaltet in den Modus "Ansicht um X drehen".
 bzw. Y	Schaltet in den Modus "Ansicht um Y drehen".
 bzw. Z	Schaltet in den Modus "Ansicht um Z drehen".

Schaltfläche	Aktion
 bzw. T	Schaltet in den Modus "Ansicht verschieben".
	Schaltet in den Modus "Zoom Rechteck".
	Vergrößert alle Ansichten.
	Verkleinert alle Ansichten.
	Zoomt alle Ansichten so, dass das komplette Modell zu sehen ist.
	Aktiviert in der 3D-Ansicht die Vorderansicht und führt ein "Zoom Alles" aus. Die Taste bleibt bis zur nächsten Veränderung der Perspektive gedrückt.
	Aktiviert in der 3D-Ansicht die Seitenansicht und führt ein "Zoom Alles" aus. Die Taste bleibt bis zur nächsten Veränderung der Perspektive gedrückt.
	Aktiviert in der 3D-Ansicht die Draufsicht und führt ein "Zoom Alles" aus. Die Taste bleibt bis zur nächsten Veränderung der Perspektive gedrückt.
	Aktiviert in der 3D-Ansicht die dreidimensionale Ansicht.
	Objekte werden als Drahtgitter (Kontur) oder ausgefüllt dargestellt
	Wechsel in der 3D-Ansicht zwischen Zentral- und Parallelprojektion

## 7.4 Beispiele

Die folgenden Beispiele sind als Anleitung für eine effektive Arbeit mit **ISOMAG** sowie zum Einarbeiten in die Programmbedienung gedacht. Sie sind im Verzeichnis C:\Programme\ISOMAG\Samples zu finden. Im Einzelnen sind dies:

- Zentrifuge.isg: Schwingungsisolierung einer Zentrifuge mit Darstellung einzelner Schritte und Dialogfelder;
- Ventilator.isg: Schwingungsisolierung eines Ventilators, der auf einem elastischen Untergrund (Stahlplatte) steht;
- Ventilator 2.isg: wie Ventilator.isg, aber mit doppelter Schwingungsisolierung;
- Baugrund.isg: Berechnung eines Blockfundamentes auf Baugrund. Dabei wird der Baugrund durch eine einzelne Feder simuliert.

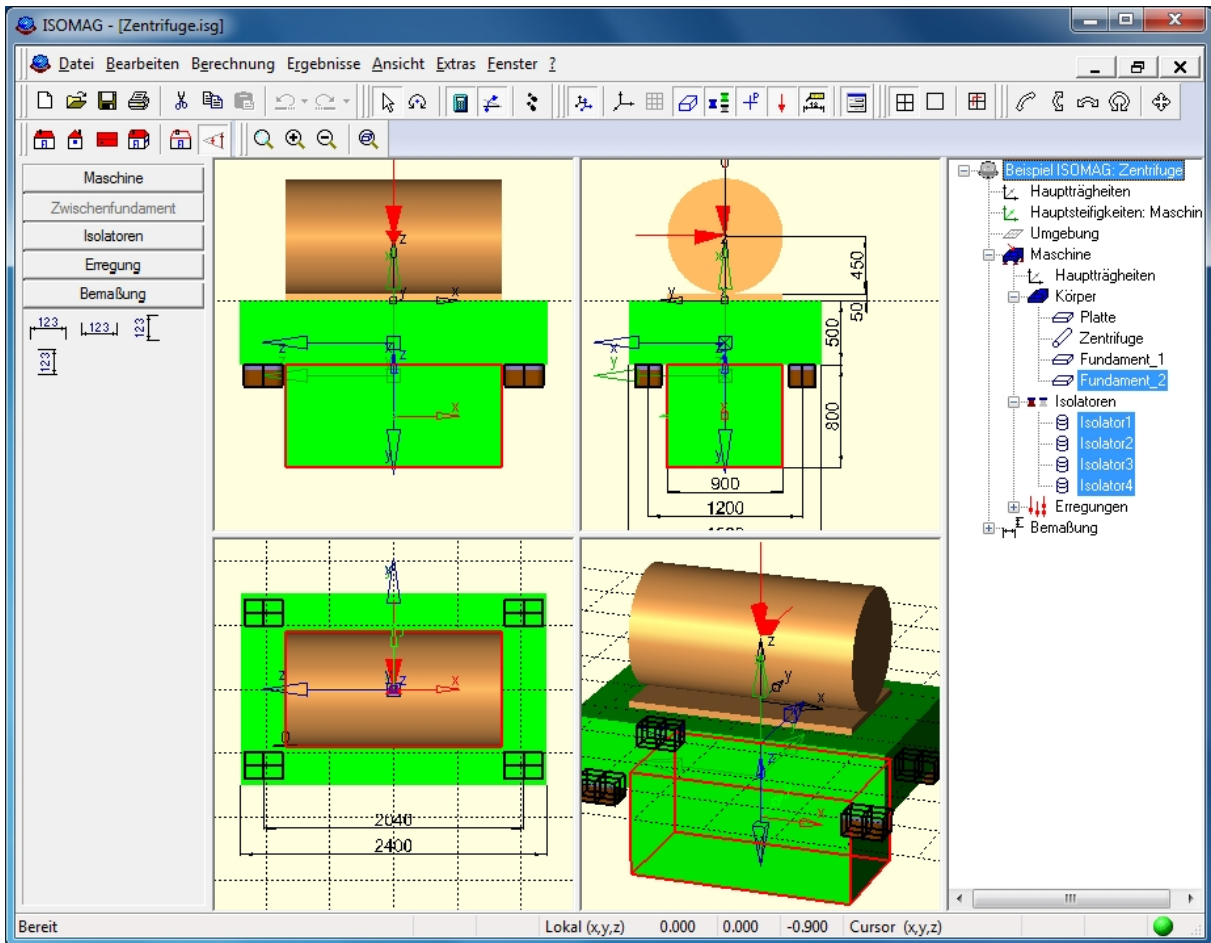
### 7.4.1 Beispiel Zentrifuge.isg

Gegeben sei eine Zentrifuge. Das Gehäuse kann idealisiert aus einem Zylinder und einer Befestigungsplatte bestehend angenommen werden. Der Zylinder hat den Durchmesser 900 mm und die Länge 1700 mm. Die Platte ist 1700 x 900 x 50 mm groß (in **Abb. 7.8** heller dargestellt). Die Zentrifuge einschließlich Befestigungsplatte hat ein Gewicht von 1920 kg. Sie wird mit einer Drehzahl von 1440 U/min betrieben. Dabei entsteht eine Zentrifugalkraft von 10 kN.

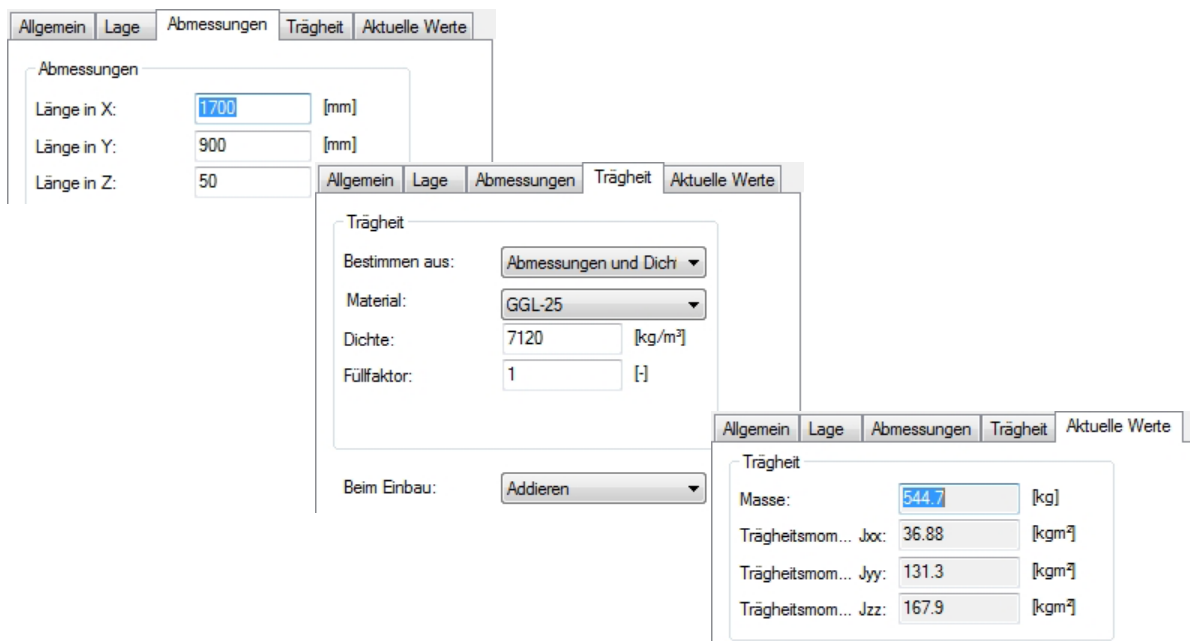
Von der Schwingungsisolierung wird gefordert, dass die Summe der auf den Boden übertragenen Kräfte maximal 200 N beträgt. Außerdem soll die vertikale Schwingungsamplitude im Massezentrum des schwingungsisolierten Objektes im Betriebszustand 0.05 mm nicht überschreiten.

In **ISOMAG** werden zunächst die Geometrie der Zentrifuge beschrieben und Angaben zu deren Trägheit gemacht. Man beginnt zweckmäßigerweise mit der Befestigungsplatte und gibt deren Geometrie und Werkstoff in einem Parameterdialog ein (**Abb. 7.9**).



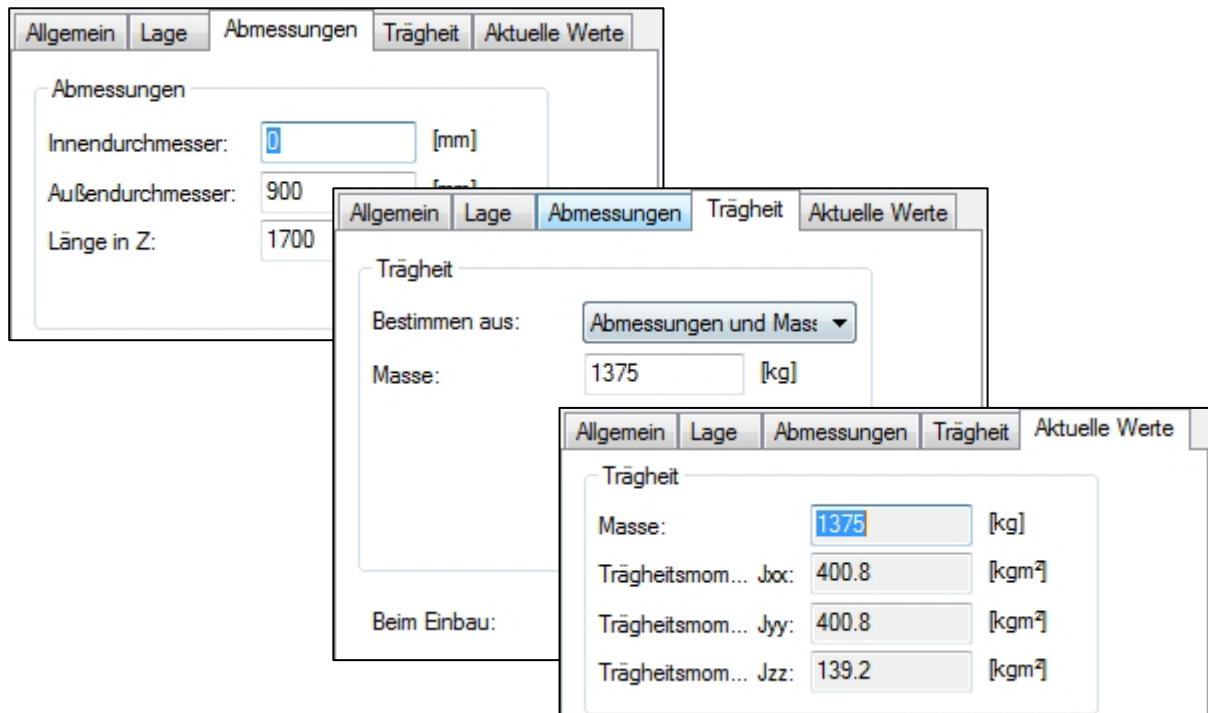


**Abb. 7.8** Modell einer schwingungs isoliert aufgestellten Zentrifuge in ISOMAG



**Abb. 7.9** Parameterdialog zur Beschreibung von quaderförmigen Grundkörpern

Die vom Programm ermittelte Masse der Befestigungsplatte beträgt knapp 545 kg (**Abb. 7.9**). Die Masse des zylindrischen Teils beträgt damit 1375 kg, die sonstigen Trägheitseigenschaften werden aus Masse und Abmessungen bestimmt. **Abb. 7.10** zeigt den Parameterdialog eines Zylinders.



**Abb. 7.10** Parameterdialog zur Beschreibung von zylindrischen Grundkörpern

Es ist anzumerken ist, dass **ISOMAG** die Trägheitseigenschaften der Körper aus verschiedenen Angaben berechnen kann (z. B. aus Geometrie und Werkstoffangabe - **Abb. 7.9** oder Abmessung und Masse - **Abb. 7.10**).

Die Zentrifugalkraft ist ein umlaufender Kraftvektor. Man kann sie mit dem Modellobjekt "Unwucht" oder mit zwei harmonischen, um 90° versetzten Kraftanregungen gleicher Größe modellieren, die senkrecht auf der Zylinderlängsachse (Zentrifugendrehachse) stehen (ausgefüllte Pfeile in **Abb. 7.8**).

Man könnte nun mit der Auslegung der Schwingungsisolierung beginnen und Steifigkeits- und Masseverhältnisse solange variieren, bis die gegebene Grenzwerte eingehalten werden. Schneller kommt man jedoch zum Ziel, wenn man sich zunächst mit der Einhaltung der Schwingwegamplitude befasst. Dieser Grenzwert kann nur bei entsprechender Masse des isoliert aufgestellten Objektes erreicht werden. Das wird deutlich, wenn man sich die Bewegungsgleichung des harmonisch krafterregten Einmassenschwingers aufschreibt.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = \hat{F} \cdot \sin(\Omega t) \quad (7.1)$$

Da der Schwinger im eingeschwungenen Zustand mit der Erregerfrequenz  $\Omega$  schwingt, kann man für die Auslenkung  $x$  den Ansatz (7.2) wählen und in (7.1) einsetzen (z.B. in [1]). Es ergibt sich (7.3).

$$x = \hat{x} \cdot \sin(\Omega t) \quad (7.2)$$

$$-m \cdot \hat{x} \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) + b \cdot \hat{x} \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t) + c \cdot \hat{x} \cdot \sin(\Omega t) = \hat{F} \cdot \sin(\Omega t) \quad (7.3)$$

Ziel der Schwingungsisolierung ist es, die Kräfte auf den Boden gering zu halten (im vorliegenden Beispiel sollen sie maximal 2 % der Erregerkraft  $F$  betragen, vgl. (7.8)). Da die gleichen Kräfte in den Federn wirken, sind die Federkräfte gegenüber den Erregerkräften vernachlässigbar. Auch die Dämpferkräfte können hier vernachlässigt werden, soweit es sich um Materialdämpfungen handelt und keine speziellen Dämpferelemente eingebaut sind. Damit vereinfacht sich (7.3) zu (7.4).

$$-m \cdot \hat{x} \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) = \hat{F} \cdot \sin(\Omega t) \quad (7.4)$$

Aus (7.4) ist ersichtlich, dass die Schwingwegamplituden  $\hat{x}$  bei gegebener Erregeramplitude  $\hat{F}$  nur von der Masse  $m$  abhängen. Stellt man die Formel (7.4) nach der Masse um (7.5), hat man eine Formel gefunden, nach der sich die erforderliche minimale Masse des zu isolierenden Objektes überschlägig berechnen lässt

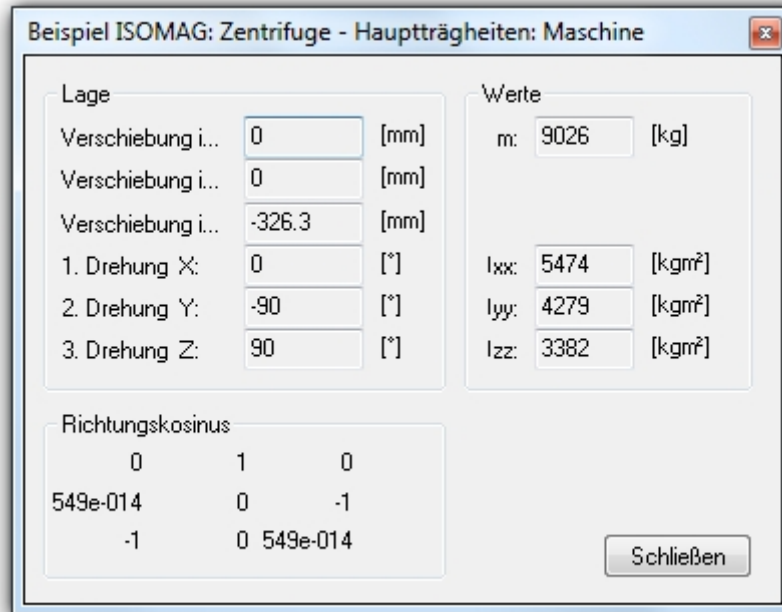
[28] , wobei in (7.5) die Beträge der Schwingungsamplituden eingehen.

$$m_{\min} = \frac{\hat{F}}{\Omega^2 \cdot \hat{x}} \quad (7.5)$$

Im vorliegenden Fall ergibt sich eine Mindestmasse von 8800 kg (7.6).

$$8800 \text{ kg} = \frac{10000 \text{ kgm} \cdot 60^2 \text{ s}^2}{(1440 \cdot 2 \cdot \pi)^2 \cdot 0.00005 \text{ ms}^2} \quad (7.6)$$

Da der Kompressor nicht genug Eigenmasse besitzt, modelliert man zunächst die in **Abb. 7.8** dunkler dargestellten Zusatzmassen (Betonfundament). Im geöffneten Ergebnisfenster "Hauptträgerheiten" kann man die Masse ändernde Wirkung des Zusatzfundamentes wertmäßig verfolgen (**Abb. 7.11**).



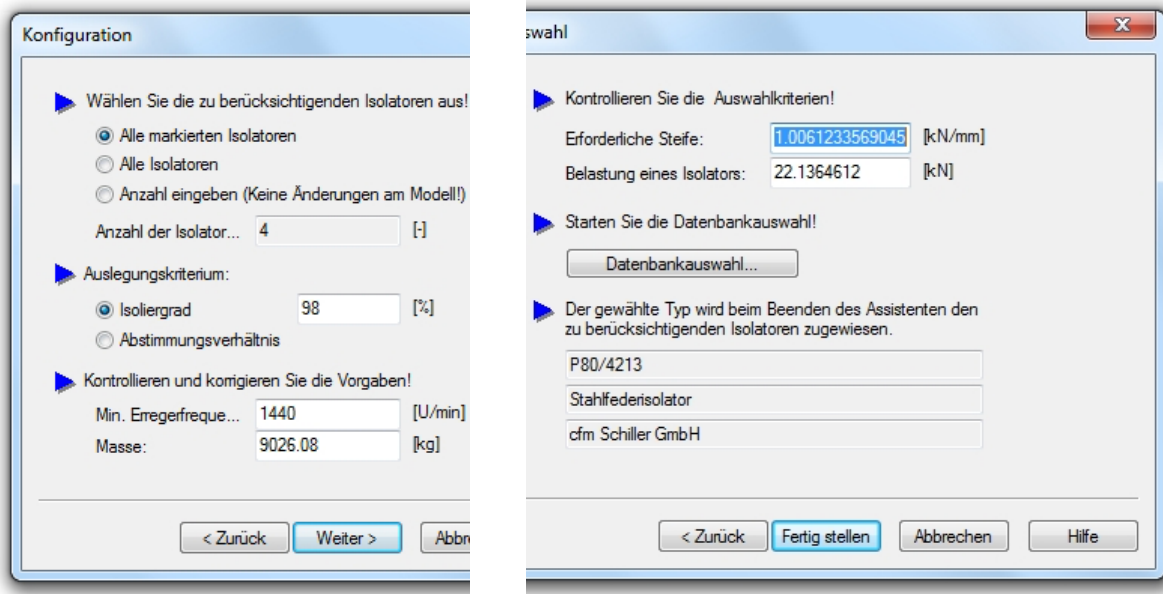
**Abb. 7.11** Hauptträgheiten des Systems Maschine

Ist die notwendige Masse erreicht, werden Isolatoren in gewünschter Lage und Anzahl platziert (in **Abb. 7.8** 4 Stück). Dabei sollte zunächst die automatische Berechnung ausgeschaltet sein, um unnötige Wartezeiten zu vermeiden. Zur Sicherung einer waagerechten Aufstellung sollte bei der Anordnung der Isolatoren darauf geachtet werden, dass der Federungsmittelpunkt mit dem Schwerpunkt der Maschine übereinstimmt (die vertikale Achse der Hauptsteifigkeit stimmt mit der vertikalen Achse der Hauptträgheiten überein).

Damit die schwingungsisolierende Wirkung erreicht wird, dürfen die Isolatoren einen bestimmten Steifigkeitswert nicht übersteigen. Außerdem müssen sie die auftretenden Belastungen ertragen. Bei der Auswahl geeigneter Isolatoren hilft ein Assistent (**Abb. 7.12**). Dieser übernimmt alle im Modell bekannten und für die Auslegung relevanten Daten, die bei Bedarf auch überschrieben werden können. Der erforderliche Isolationsgrad  $i$  beträgt im Beispiel 98 % und ergibt sich gemäß seiner Definition **(7.7)** aus der gegebenen Erregerkraftamplitude und der zulässigen Kraftwirkung auf den Boden  $\hat{F}_B$  **(7.8)**.

$$i = 1 - \frac{\hat{F}_B}{\hat{F}} \quad (7.7)$$

$$i = 1 - \frac{200N}{10000N} \quad (7.8)$$



**Abb. 7.12** Assistent Einfache Schwingungsisolierung

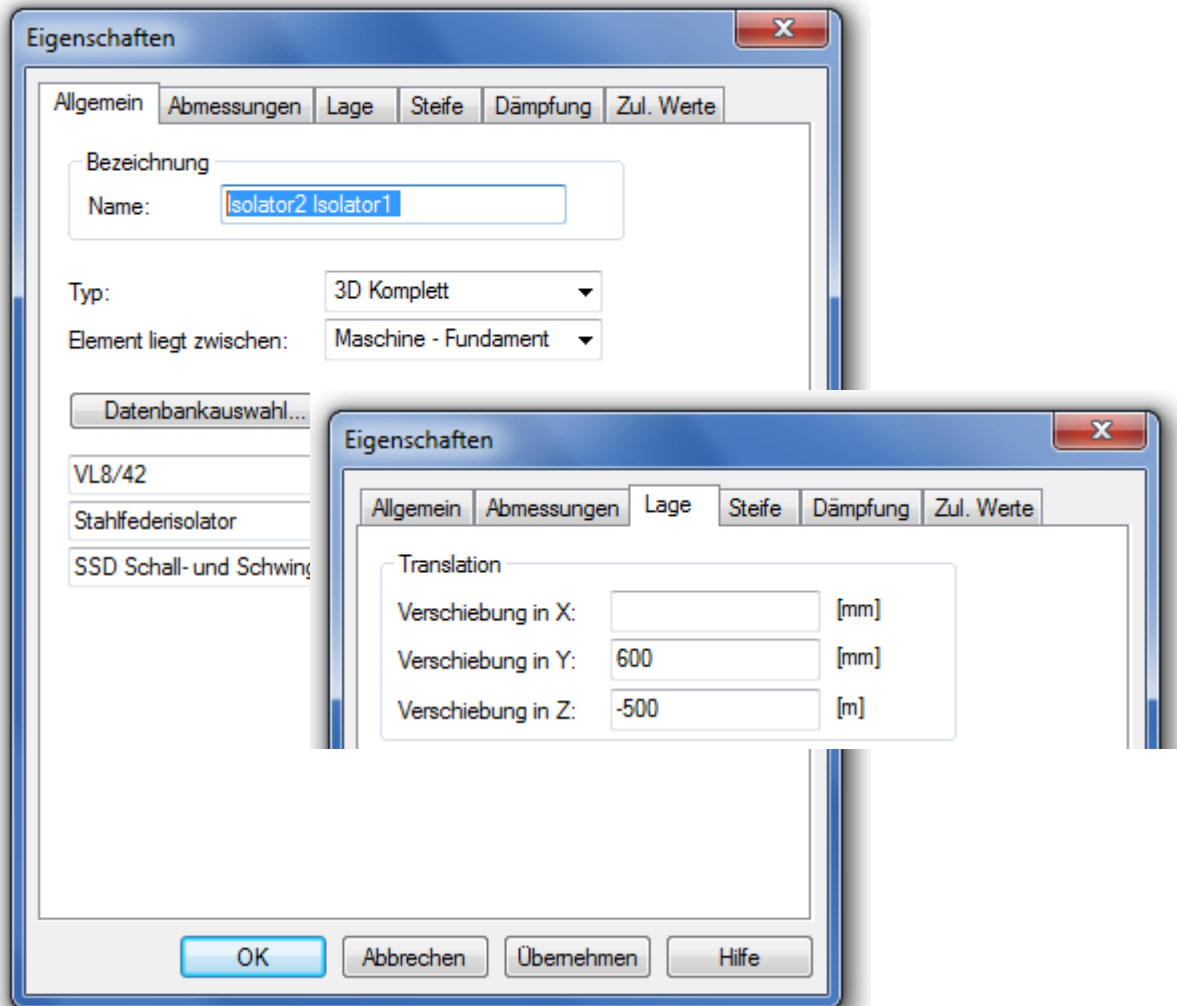
Aus den Eingangsdaten berechnet der Assistent die erforderliche Steife und die zu ertragende Belastung der Isolatoren. Mit diesen Werten (und weiteren Auswahlkriterien bei Bedarf) kann man in einer Datenbank, die derzeit über 3000 Isolatoren von 18 Herstellern enthält, nach geeigneten Isolatoren suchen lassen (**Abb. 7.13**, siehe auch Abschnitt 5.1). Mit den Werten des ausgewählten Isolatortyps wird anschließend das Modell parametrisiert.

Artikel_Nr	Typ	Firma	cAusl kN/mm	Fmax [kN]	Fmin [kN]	Cx kN/mm	Cy kN/mm	Cz kN/mm	CPhix kNm/rad	CPhiy kNm/rad	CPhiz kNm/rad	Dx	D
P80/4213	Stahlfeder	cfm Schill	0,676	27,975	16,785	0,352	0,352	0,676	0	0	0	0	0
V 550	U	IT-Isolierte	0,9615	22,5	10	0,6745	0,6745	0,9615	0	0	0	0	0
W 550	U	IT-Isolierte	0,6452	26	12	0,4762	0,4762	0,6452	0	0	0	0	0
W 750	U	IT-Isolierte	0,9033	36	17,5	0,6667	0,6667	0,9033	0	0	0	0	0
FS330-11	Faltenbalg	ContiTect	0,46	23,3	18,7	0,28	0,28	0,46	0	0	0	0,03	0,03
FS530-11	Faltenbalg	ContiTect	0,44	23,2	16,6	0,395	0,395	0,44	0	0	0	0,03	0,03
FS530-11	Faltenbalg	ContiTect	0,543	29,715	21,57	0,427	0,427	0,543	0	0	0	0,03	0,03
FD330-22	Faltenbalg	ContiTect	0,25	22,5	17,5	0,06	0,06	0,25	0	0	0	0,03	0,03
FD530-22	Faltenbalg	ContiTect	0,29	23,9	18,1	0,13	0,13	0,29	0	0	0	0,03	0,03
GST1 - 453	Stahlfeder	GERB Sc	0,636	27,1	1,91	0,508	0,508	0,636	0	0	0	0	0
GST1 - 456	Stahlfeder	GERB Sc	0,912	41,9	2,74	0,54	0,54	0,912	0	0	0	0	0

**Abb. 7.13** Suche in der Isolatoren-Datenbank

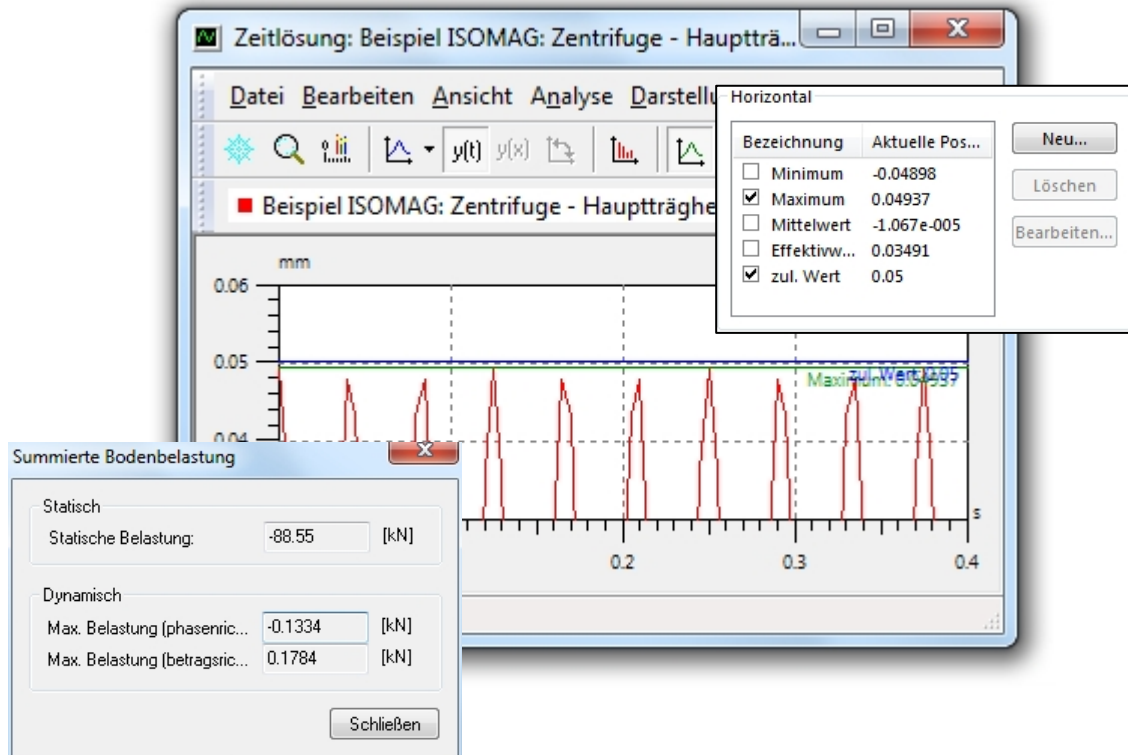
Da nunmehr die Isolatorgöße feststeht, kann die endgültige Ausrichtung der Isolatoren erfolgen. Nach Anordnung des Isolators1 sind die weiteren nach diesem auszurichten. Dazu sind jeweils zwei Isolatoren zu markieren, das Kontextmenü Eigen-

schaften aufzurufen und in der Registerkarte Lage die gemeinsame(n) Koordinate(n) einzutragen (**Abb. 7.14**).



**Abb. 7.14** Gleichzeitige Ausrichtung von mehreren Isolatoren

Da die Auslegungsrechnung für den Einmassenschwinger in vertikaler Richtung erfolgt, besteht die Möglichkeit, dass Resonanzüberhöhungen mit anderen Schwingungsmoden auftreten. Ob die vorgegebenen Grenzwerte für Bodenkraft und Vertikalschwingweg auch im räumlichen System erreicht werden, zeigen die Ergebnisse der Nachrechnung (**Abb. 7.15**).



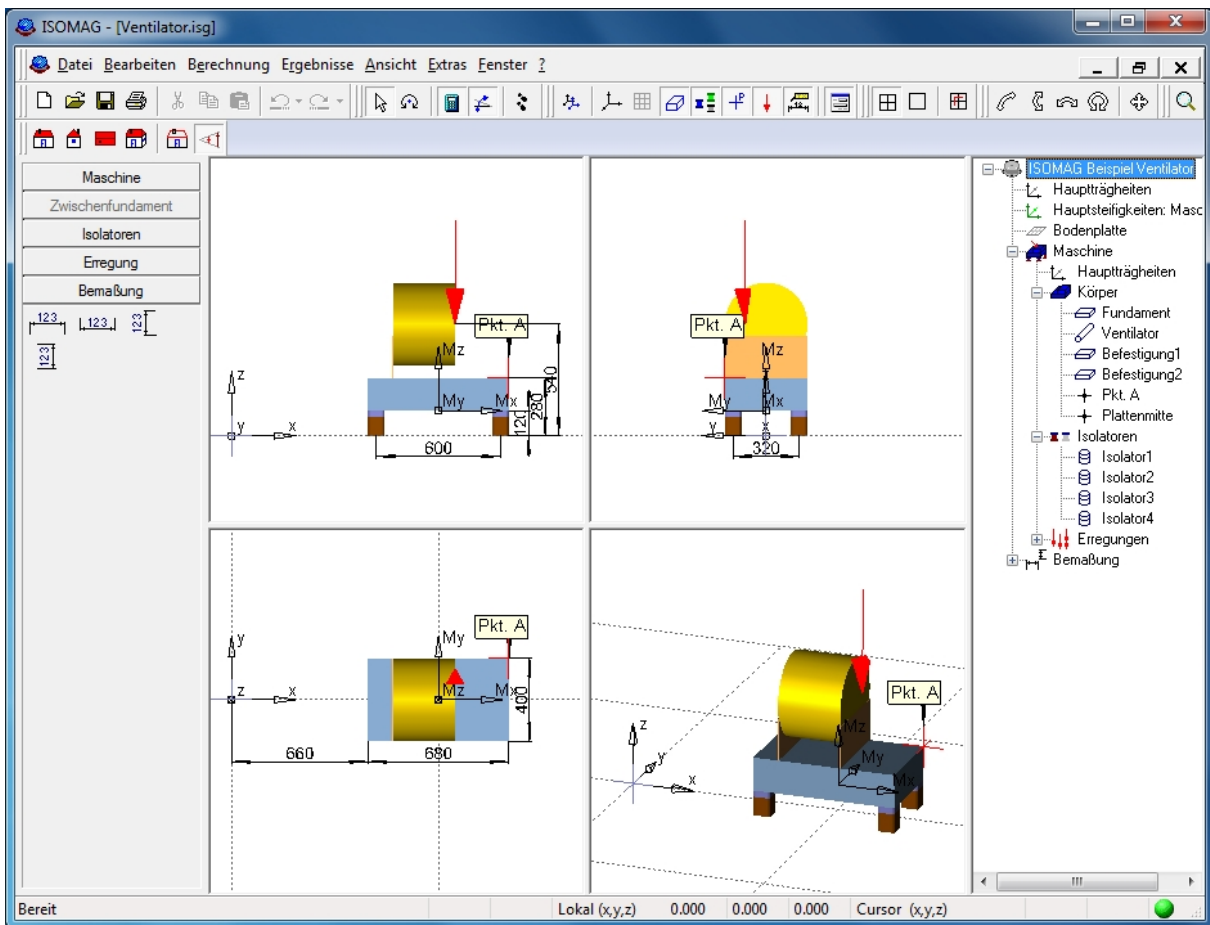
**Abb. 7.15** Ergebnisse der Nachrechnung (Auswahl)

Die 'Zeitlösung – Hauptträgheiten ...' im obigen Bild erhält man über das Kontextmenü von Maschine – Hauptträgheiten. Die Einstellung der Diagrammeigenschaften (Achsen, Linien) ist in Abschnitt 5.3 ausführlich dargestellt.

Änderungen am Modell sind jederzeit möglich. Damit lassen sich die Systemeigenschaften weiter gezielt verbessern oder Parameterstudien durchführen.

## 7.4.2 Beispiel Ventilator.isg

Ein auf einem Betonfundament mit den Abmaßen  $0,68 \times 0,4 \times 0,16 \text{ m}^3$  (Masse: ca. 100 kg) befestigter Ventilator mit einer Drehfrequenz von 5 Hz soll auf einer 10 cm dicken Stahlplatte mit den Abmessungen  $4 \times 4 \text{ m}^2$  außermittig schwingungs isoliert aufgestellt werden. Die Unwuchterregung wird durch eine vertikale Kraft von 10 N ersetzt. Die dynamische Belastung der Bodenplatte darf nur ein Drittel der Unwuchtkraft des Rotors betragen. Der Effektivwert der vertikalen Beschleunigung im Betriebszustand darf nicht größer als  $0,2 \text{ m/s}^2$  sein. Größe, Lage und Parameter der Elemente sind dem Beispiel zu entnehmen.



**Abb. 7.16** Arbeitsblatt Beispiel Ventilator.isg

Zunächst werden die Einzelteile der Maschine, die Erregung und die Bodenplatte (Umgebung) modelliert (Objektleiste – Objekt auswählen – mit Klick auf Arbeitsblatt erzeugen – parametrieren/positionieren). Die Lageinformationen der Maschinenbestandteile sind dabei auf das Maschinenkoordinatensystem (im Beispiel: geometrische Mitte der Sohlfläche des Fundamentes) bezogen, d. h. die Verschiebung der Maschine relativ zur Umgebung wird noch nicht berücksichtigt. Auf gleiche Weise wird der für die Überprüfung der Vertikalbeschleunigung notwendige Punkt A definiert. Die außermittige Aufstellung der Maschine wird dann durch eine Änderung des Maschinenkoordinatensystems (im Projektbaum: Maschine – Eigenschaften – Lage - x: 1 m) bewirkt. Es ist sinnvoll, während dieser Modellierung die automatische Para-

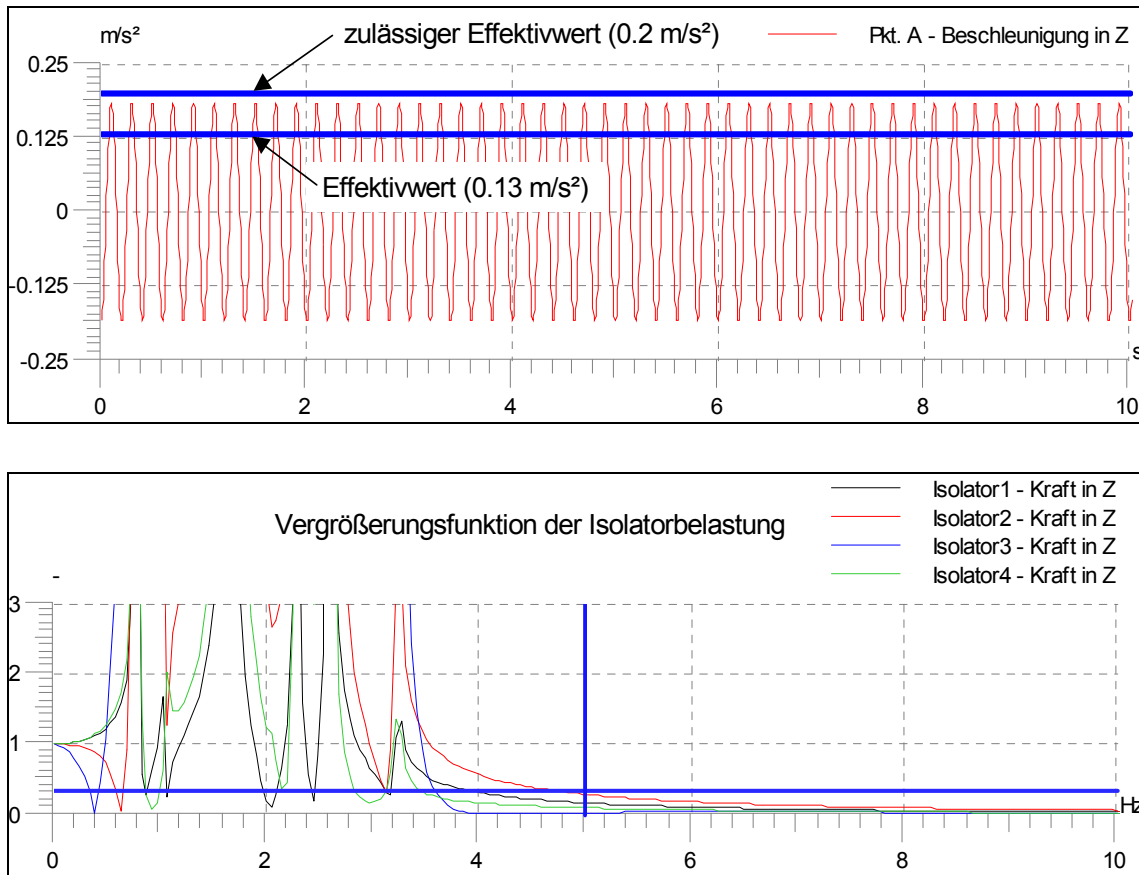


metrierung (Parameterdialog) auszuschalten. Diese Vorgehensweise der Nutzung des Maschinenkoordinatensystems ist dann von Vorteil, wenn die Lage der Maschinenteile untereinander bekannt ist, der Aufstellungsort der Maschine relativ zur Umgebung aber noch unsicher ist. Durch eine Veränderung des Maschinenkoordinatensystems wird die gesamte Maschine verschoben, die Lagekoordinaten der Bauteile (Körper, Isolatoren, Erregungen, Punkte) werden dabei nicht geändert, da sie relativ zum Maschinenkoordinatensystem definiert sind. Im Normalfall sind das globale und das Maschinenkoordinatensystem identisch (siehe auch Abschnitt 3.1.1).

Anschließend werden bei ausgeschalteter sofortiger Parametrierung vier Isolatoren an die Fundamentecken gesetzt. Da die Abmessungen der Isolatoren noch nicht endgültig festliegen, ist eine sehr genaue Ausrichtung nicht notwendig. Nach Start des Assistenten für einfache Schwingungsisolierung wird der gewünschte Isolationsgrad (67%) bzw. das Abstimmungsverhältnis 2 eingegeben. Erregerfrequenz und Masse werden automatisch dem Modell entnommen. Die Datenbankauswahl liefert mehrere Isolatoren, mit denen das gewünschte Isolierungsziel erreicht werden kann. Im Beispiel wurde der Isolator VL8/42 ausgewählt, da er unter den zur Auswahl stehenden die kleinste Federkonstante in z-Richtung hat. Bei einer größeren Anzahl von Isolatoren kann der weichste Isolator durch einen Klick auf den Spaltenkopf 'c<sub>z</sub>' in die oberste Spalte gebracht werden (entspricht Sortieren nach c<sub>z</sub>).

Die Kontrolle der z-Beschleunigung des Punktes A erfolgt über die Zeitlösung der Beschleunigung in z (Punkt anklicken, mit der rechten Maustaste Kontextmenü öffnen, Zeitlösung/Beschleunigung/in z wählen). Der Effektivwert ist über Darstellung - Hilfslinien – horizontal als Zahlenwert sichtbar und nach Anklicken des Kontrollkästchens als Linie im Diagramm sichtbar. Der maximal zulässige Wert wird unterschritten (siehe **Abb. 7.17**).

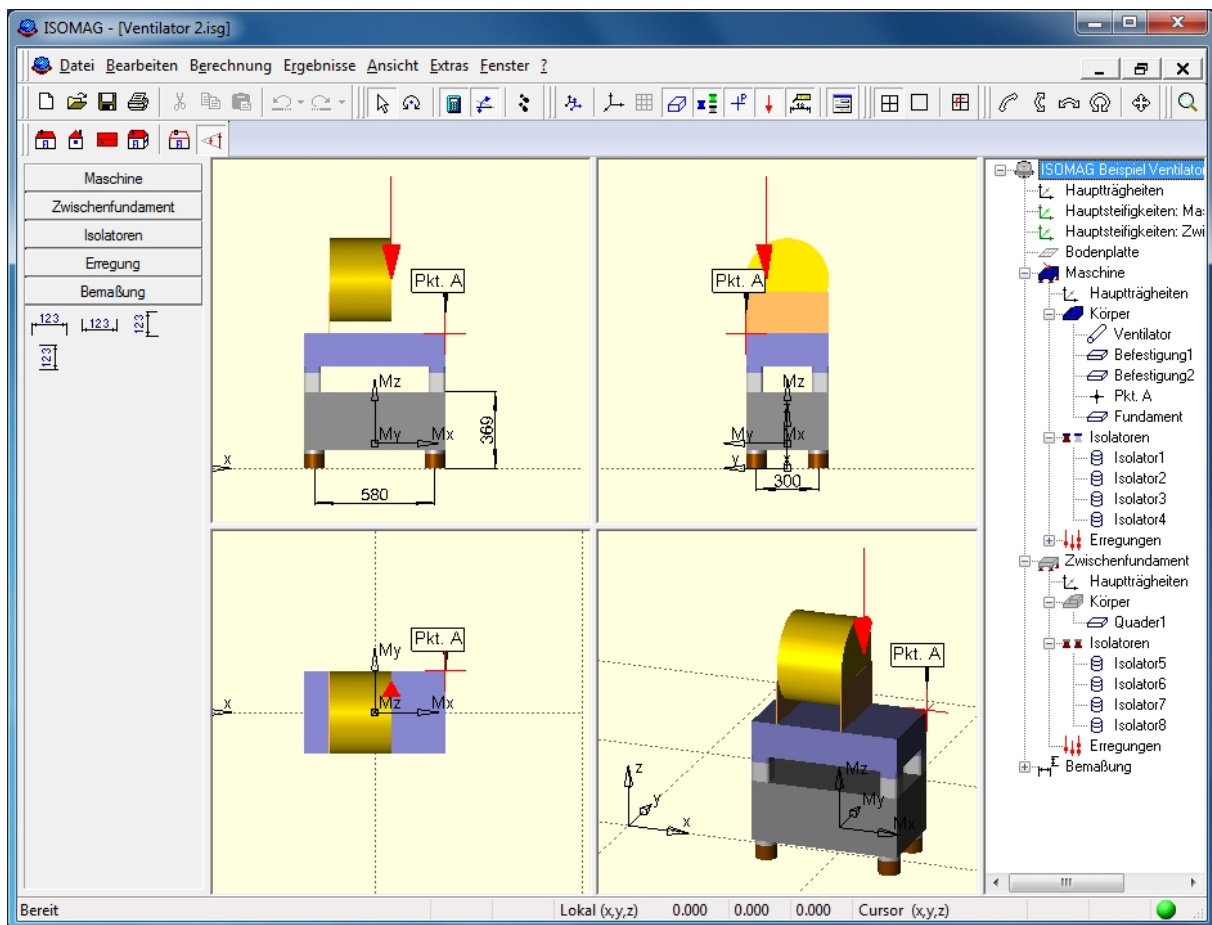
Da nun die Abmessungen der Isolatoren feststehen, können sie interaktiv mit der Maus exakt an die Ecken des Fundamentes gezogen werden. Um die Maschine so anzuheben, dass die Isolatoren auf der Stahlplatte stehen, erfolgt wie oben eine Änderung des Maschinenkoordinatensystems (z-Koordinate = Höhe der Isolatoren). Die Kontrolle der Einhaltung der Vergrößerungsfunktion erfolgt entweder durch die Anzeige der Gesamt-Bodenbelastung (im Projektbaum: Bodenplatte /summierte Bodenbelastung/Maximalwerte) oder über die Zeitlösungen der phasen- oder betragsrichtig summierten Bodenbelastung im Vergleich zur Erregerkraft von 10 N. Indem die Vergrößerungsfunktionen der Belastung an allen Isolatoren (alle Isolatoren markieren – Kontextmenü: Dynamische Belastung/Vergrößerungsfunktion/ Belastung/in z) angezeigt werden, bekommt man ebenfalls eine übersichtliche grafische Darstellung für den zu druckenden Bericht (siehe **Abb. 7.17**). Die hier dargestellte Auflösung kann über das Menü Darstellung/ Eigenschaften und entsprechende Eintragungen bei x- und y-Achse oder über die Zoom-Schaltfläche und Auswahl des passenden Ausschnitts erzeugt werden.



**Abb. 7.17** Ergebnisse des Beispiels Ventilator.isg

Nach Eintragen zusätzlicher Informationen in die Projektbeschreibung (Extras/ Projekteinstellungen) wird das Modell bemaßt. Um die Verschiebung der Maschine relativ zum Plattenmittelpunkt bemaßen zu können, wird ein Punkt in der Mitte der Bodenplatte erzeugt, an dem das Maß 660 befestigt werden kann. Damit ist die Modellierung und Auslegung abgeschlossen. Über Datei – Seitenansicht kann das Druckprogramm (Druck-Designer) zum Gestalten und Ausdrucken der Dokumentation gestartet werden. Es werden nur diejenigen Ergebnisverläufe in das zu druckende Dokument übernommen werden, die zum Zeitpunkt des Starts des Druck-Designers geöffnet sind. Damit ist eine zweckentsprechende Auswahl der darzustellenden Ergebnisse durch den Bearbeiter möglich. Ein zusätzliches Beschriften der Ergebnisdiagramme wie in **Abb. 7.17** kann entweder direkt im Druck-Designer über die Text-Schaltfläche bzw. über das Menü Bearbeiten – neues Objekt einfügen (z. B. MS Word-Grafik) erfolgen. Die zu ergänzende Grafik kann darüber hinaus im Druck-Designer kopiert, in einem beliebigen Grafikprogramm (z.B. MS Powerpoint) ergänzt und über Einfügen wieder in die Ansicht des Druck-Designers (oder ein beliebiges anderes Windows-Programm) eingefügt werden.

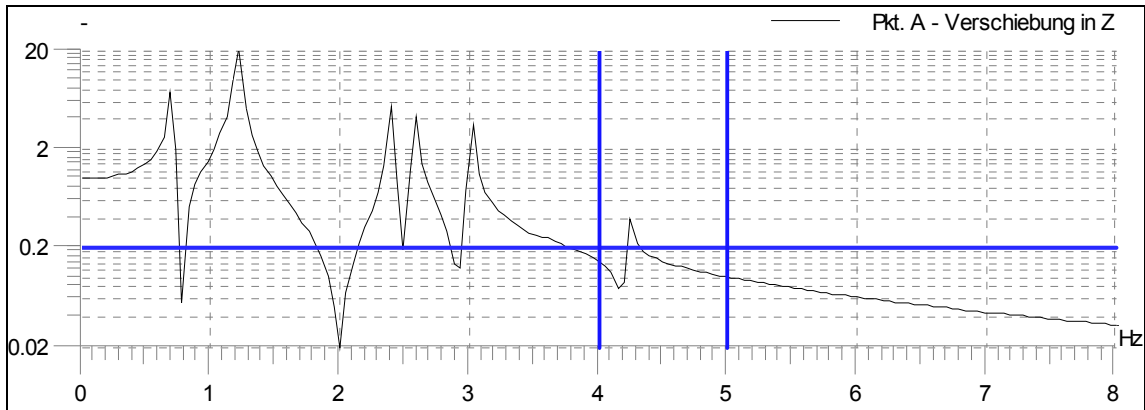
### 7.4.3 Beispiel Ventilator 2.isg



**Abb. 7.18** Arbeitsblatt Beispiel Ventilator 2.isg

Wird im obigen Beispiel Ventilator.isg die Erregung um eine zweite Komponente mit 4 Hz Erregerfrequenz ergänzt, so ist ein nunmehr geforderter Isolationsgrad von 80% mit einfacher Schwingungsisolierung mit den in der Datenbank vorhandenen Isolatoren nicht zu erreichen. Deshalb soll eine doppelte Schwingungsisolierung angewendet werden. Durch Start des Assistenten für doppelte Schwingungsisolierung wird nach Angabe des Isolationsgrades ein geeignetes Fundament erzeugt. Aus der Datenbank werden passende Isolatoren ausgewählt, und die Maschine wird um die Gesamthöhe von erzeugtem Fundament und eingefügten Isolatoren angehoben, so dass sie wieder auf dem bisherigen Untergrund steht. Gleichzeitig wird die Zuordnung der bisherigen Isolatoren von 'Maschine – Umgebung' auf 'Maschine – Zwischenfundament' umgestellt. Da mit der vorgeschlagenen Höhe des Zwischenfundamentes keine passenden Isolatoren gefunden werden können, muss die Fundamentdicke stufenweise vergrößert werden, bis bei 0.28 m Dicke ein passender Isolator gefunden wird.

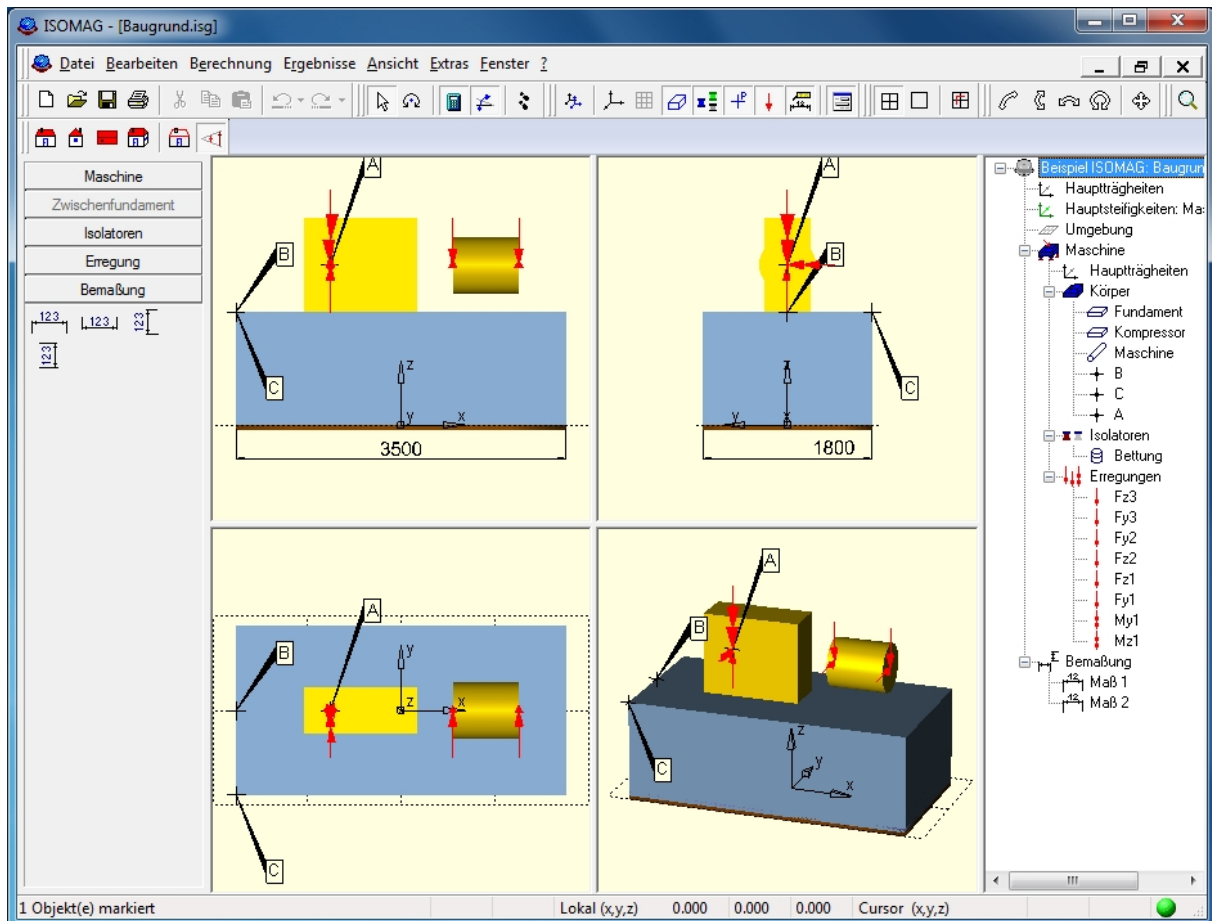
In der in **Abb. 7.19** angegebenen Vergrößerungsfunktion (z-Verschiebung des Punktes A) ist eine Überschreitung des Isolationsgrades (horizontale Linie) zwischen den beiden Erregerfrequenzen trotz der Einhaltung des Isolationsgrades bei den beiden Erregerfrequenzen sichtbar. Das Verhältnis von Maximalwert der dynamischen Verschiebung z zu statischer Verschiebung z des Punktes A von 0,17 erreicht aber den erforderlichen Isolationsgrad.



**Abb. 7.19** Ventilator 2.isg: Vergrößerungsfunktion der z-Verschiebung Pkt. A

### 7.4.4 Beispiel Baugrund.isg

In diesem Beispiel werden die Amplituden von Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung an mehreren Punkten eines Kompressorenfundamentes berechnet, wobei das Fundament direkt auf dem Baugrund abgesetzt ist. Es wurde [27], S. 92 ff. entnommen. Größe, Lage und Parameter der Elemente sind dem Beispiel zu entnehmen.



**Abb. 7.20** Arbeitsblatt Beispiel Baugrund.isg

Die Berechnung der Steifigkeits- und Dämpfungswerte der den Baugrund ersetzenden Einzelfeder ist in Abschnitt 2.7.2 ausgeführt. Wesentlich bei der Erstellung der Feder ist, dass der Schwerpunkt der Feder mit dem Flächenschwerpunkt der Sohlfläche übereinstimmt. Die äußeren Abmessungen des Federelementes spielen keine Rolle und wurden im Beispiel nur aus optischen Gründen auf die Fundamentgröße gesetzt. Als Parameter wurden die Bettungszahl  $C$  mit  $C = 120\,000 \text{ kN/m}^3$  und der Dämpfungswert  $\Phi$  mit  $\Phi = 0.007 \text{ s}$  angesetzt. Um Setzungserscheinungen zu verhindern, darf der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit am Fundamentboden nicht größer als  $9 \text{ mm/s}$  sein.

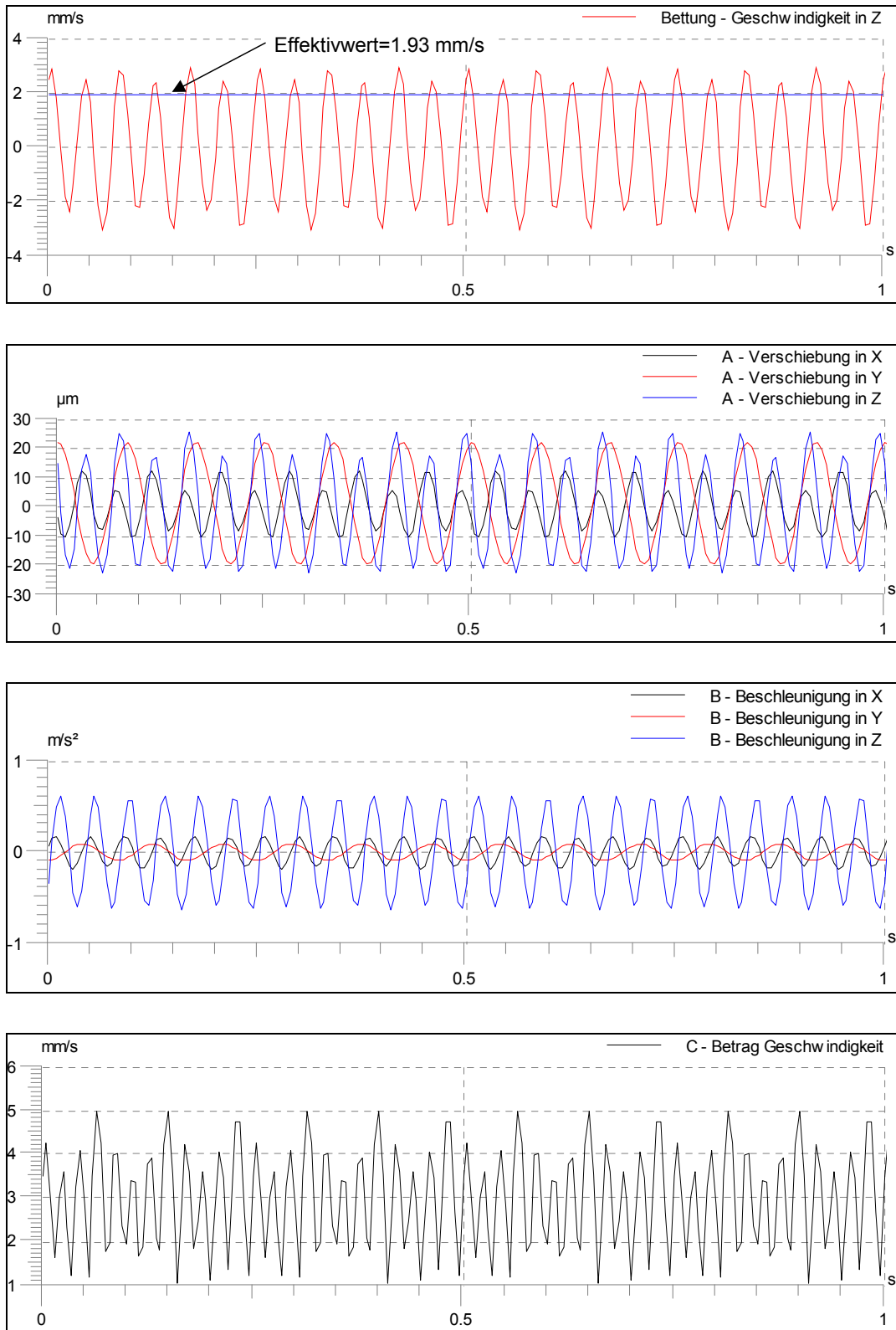
Als Erregung sind die Anregungskräfte des Kompressors bis zur zweiten Harmonischen sowie die in Einzelkomponenten aufgeteilten Unwuchtkräfte des Antriebsmotors angesetzt. Zu berechnen sind die Eigenfrequenzen sowie die maximalen Ver-

schiebungen an Punkt A, die Effektivwerte der Beschleunigungen an Punkt B und die Effektivgeschwindigkeit des Punktes C.

Nach [27] sind als Ergebnisse zu erwarten:

- Verschiebung in A (max. Werte):  $u_x=12,8 \mu\text{m}$ ,  $u_y=14,8 \mu\text{m}$ ,  $u_z= 21,4 \mu\text{m}$ .
  - Beschleunigung in B (eff. Werte):  $a_x=0,08 \text{ m/s}^2$ ,  $a_y=0,06 \text{ m/s}^2$ ,  $a_z= 0,34 \text{ m/s}^2$ .
  - Betrag der effektiven Geschwindigkeit in C:  $v_c=2,37 \text{ mm/s}$ .
- In der nachfolgenden Abbildung sind die berechneten Ergebnisse in grafischer Form angegeben.

Im Wesentlichen ergeben sich gleiche Ergebnisse wie bei [27]]. Lediglich die effektive Geschwindigkeit ist in [27] deutlich geringer als bei ISOMAG. Dies erklärt sich aus der unterschiedlichen Definition: [27] berechnet den Effektivwert der Geschwindigkeit mit  $v_{\text{eff}} = \omega \cdot \sqrt{(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) / 2}$ , während **ISOMAG** als Geschwindigkeitsbetrag den Vektorbetrag des Vektors  $v(t) = (v_x(t), v_y(t), v_z(t))$  bildet und dies als Zeitfunktion auffasst. Der Effektivwert dieser Funktion muss zwangsweise deutlich größer als der mit der obigen Definition berechnete Wert sein.



**Abb. 7.21** Ergebnisse des Beispiels Baugrund.isg