



Fassung  
September 2015

## Zusatzmodul

# RF-DYNAM PRO

Eigenschwingungsanalyse, Antwort-  
spektren, Zeitverlaufsverfahren, äqui-  
valente statische Kräfte

## Programmbeschreibung

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der DLUBAL SOFTWARE GMBH ist  
es nicht gestattet, diese Programmbeschreibung oder Teile daraus  
auf jedwede Art zu vervielfältigen.



© Dlubal Software GmbH 2015

**Am Zellweg 2  
D-93464 Tiefenbach  
Deutschland**

**Tel.: +49 9673 9203-0  
Fax: +49 9673 9203-51  
E-mail: [info@dlubal.com](mailto:info@dlubal.com)  
Web: [www.dlubal.de](http://www.dlubal.de)**



# Inhalt

	Inhalt	Seite
<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Zusatzmodul RF-DYNAM Pro	2
1.2	RF-DYNAM Pro Team	5
1.3	Gebrauch des Handbuchs	6
1.4	RF-DYNAM Pro Modul starten	6
<b>2.</b>	<b>Eingabedaten</b>	<b>8</b>
2.1	Aufbau der Hauptregisterkarten	9
2.2	Massenfälle	10
2.2.1	Zusätzliche Knotenmassen	11
2.2.2	Zusätzliche Linien-, Stab- und Flächenmassen	12
2.3	Massenkombinationen	13
2.4	Eigenschwingungsfälle	14
2.4.1	Anzahl der Eigenwerte	14
2.4.2	Einwirkende Massen	15
2.4.3	Typ der Massenmatrix	16
2.4.4	Skalierung der Eigenformen	17
2.4.5	Eigenwertlöser	17
2.4.6	FE-Netz-Einstellungen	17
2.4.7	Steifigkeitsänderungen und Normalkräfte als Anfangsbedingungen	18
2.5	Antwortspektren	18
2.6	Akzelerogramme	22
2.7	Zeitdiagramme	25
2.8	Dynamische Lastfälle	27
2.8.1	Antwortspektrenverfahren	28
2.8.2	Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen	31
2.8.3	Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen	35
2.8.4	Ersatzlastverfahren	36
2.9	Allgemeine Einstellungen im Dialog <i>Details</i>	38
2.10	Einheiten und Dezimalstellen	40
<b>3.</b>	<b>Berechnung</b>	<b>41</b>
3.1	Kontrolle	41
3.2	Start der Berechnung	41
3.3	Verfügbarkeit der Ergebnisse	43
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>44</b>
4.1	Eigenschwingungsfälle	45
4.2	Dynamische Lastfälle - Antwortspektrenverfahren	48
4.3	Dynamische Lastfälle - Zeitverlaufsverfahren	50
4.4	Dynamische Lastfälle - Ersatzlastverfahren	56
4.5	Ausdruckprotokoll	59
4.6	Einheiten und Dezimalstellen	60
<b>5.</b>	<b>Beispiele</b>	<b>62</b>
<b>A.</b>	<b>Literatur</b>	<b>63</b>
<b>B.</b>	<b>Index</b>	<b>64</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Zusatzmodul RF-DYNAM Pro

Ganz gleich, ob Sie das Programm zum ersten Mal verwenden oder ein erfahrener Anwender der früheren RF-DYNAM Versionen sind, werden Sie sich schnell in das neue Zusatzmodul einarbeiten. All die wertvollen Hinweise unserer Kunden zu ihrer täglichen Praxis haben uns dabei geholfen, dieses Zusatzmodul zu entwickeln und zu verbessern. Es sind viele neue Leistungsmerkmale enthalten, was die Möglichkeiten der dynamischen Analyse verbessert und erweitert.

Das Modul *RF-DYNAM Pro* besteht aus drei Teilen. Das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* ist das Basismodul, das die Eigenschwingungsanalysen für Stab-, Flächen- und Volumenmodelle durchführt. Ein multi-modales und multi-punkt Antwortspektrenverfahren, sowie ein lineares Zeitverlaufsverfahren kann an der vorliegenden Struktur mit dem Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* durchgeführt werden. Im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* kann das statische Ersatzlastverfahren in Übereinstimmung mit unterschiedlichen Baunormen angewendet werden (unter Verwendung des multi-modalen Antwortspektrenverfahrens).

Wir wünschen viel Erfolg bei der Arbeit mit *RF-DYNAM Pro*.

Ihre DLUBAL SOFTWARE GMBH

## Eigenschwingungen

*RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* bestimmt die niedrigsten Eigenwerte der Struktur. Die Anzahl der Eigenwerte kann angepasst werden. Massen werden direkt aus Lastfällen oder Lastkombinationen importiert (mit der Option, die Gesamtlast oder nur die *Z*-Komponente zu berücksichtigen). Zusätzliche Massen können manuell an Knoten, Linien, Stäben oder Flächen definiert werden. Darüber hinaus kann die Steifigkeitsmatrix beeinflusst werden, indem Normalkräfte oder Steifigkeitsänderungen eines Lastfalls oder einer Lastkombination importiert werden. Die Hauptmerkmale sind nachfolgend aufgeführt:

- Automatische Berücksichtigung von Massen aus Eigengewicht
- Direkter Import von Massen aus Lastfällen oder -kombinationen möglich
- Optionale Definition von Zusatzmassen (Knoten-, Linien-, Flächenmassen sowie Trägheitsmassen)
- Kombination von Massen in verschiedenen Massenfällen und Massenkombinationen
- Voreingestellte Kombinationsfaktoren gemäß EN 1998-1 CEN
- Optionaler Import von Normalkraftverläufen (z. B. zur Berücksichtigung von Vorspannung)
- Steifigkeitsmodifizierung (z.B. können deaktivierte Stäbe oder Steifigkeiten aus *RF-BETON* importiert werden)
- Berücksichtigung von ausfallenden Lagern oder Stäben als Anfangsbedingungen möglich
- Definition von mehreren Eigenschwingungsfällen möglich (z.B. um unterschiedliche Massen oder Steifigkeitsänderungen zu untersuchen)
- Ausgabe von Eigenwert, Kreisfrequenz, Eigenfrequenz und -periode
- Ermittlung von Eigenformen und Massen in FE-Netz-Punkten
- Ausgabe von modalen Massen, effektiven modalen Massen und modalen Massenfaktoren
- Darstellung und Animation von Eigenformen

- Verschiedene Skalierungsoptionen für Eigenformen
- Dokumentation von numerischen und graphischen Ergebnissen im Ausdruckprotokoll

In *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* sind vier leistungsfähige Eigenwertlöser verfügbar:

- Wurzel des charakteristischen Polynoms
- Lanczos-Methode
- Unterraum-Iteration
- ICG-Iterationsmethode (Incomplete Conjugate Gradient)

Die Wahl des Eigenwertlösers hängt in erster Linie von der Größe des Modells ab.

Nach der Berechnung werden die Eigenwerte, Eigenfrequenzen und -perioden aufgelistet. Diese Ergebnismasken sind im Hauptprogramm RFEM integriert. Die Eigenformen der Struktur werden in Tabellenform angezeigt und können grafisch dargestellt sowie animiert werden. Alle Ergebnismasken und Grafiken sind Bestandteil des RFEM-Ausdruckprotokolls. Zudem ist ein Export der Tabellen in Excel möglich.

## Erzwungene Schwingungen

*RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* ist eine Erweiterung des RFEM-Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro Eigenschwingungen*. Mechanische Strukturen, die durch transiente oder harmonische Kraft-Zeit oder Beschleunigungs-Zeit-Diagramme erregt werden, können unter Verwendung der Modalanalyse oder der direkten Integration untersucht werden. Darüber hinaus können das multi-modale sowie des multi-punkt Antwortspektrenverfahren durchgeführt werden. Die dazu benötigten Spektren können entsprechend den Normen oder benutzerdefiniert erstellt werden. Im Zusatzmodul ist eine umfangreiche Bibliothek von Akzelerogrammen aus Erdbebengebieten enthalten. Diese können zur Generierung von Antwortspektren verwendet werden.

Die Leistungsmerkmale des Zeitverlaufverfahrens sind nachstehend aufgeführt:

- Kombination von benutzerdefinierten Zeitdiagrammen mit Lastfällen oder Lastkombinationen (Knoten-, Stab- und Flächenlasten sowie freie und generierte Lasten sind mit zeitlich veränderbaren Funktionen kombinierbar)
- Kombination von mehreren unabhängigen Erregerfunktionen möglich
- Umfangreiche Bibliothek von Erdbebenaufzeichnungen (Akzelerogramme)
- Modalanalyse oder direkte Integration im Zeitverlaufsverfahren verfügbar
- Strukturdämpfung über die Rayleigh-Dämpfungskoeffizienten oder den Lehr'schen Dämpfungswerten
- Direkter Import von Anfangsverformungen aus einem Lastfall oder einer Lastkombination möglich
- Grafische Ergebnisdarstellung in einem Zeitverlaufsdiagramm
- Export von Ergebnissen in benutzerdefinierten Zeitschritten oder als Umhüllende

Die Leistungsmerkmale des Antwortspektrenverfahrens sind nachstehend aufgeführt:

- Antwortspektren zahlreicher Normen (EN 1998 [1], DIN 4149 [2], IBC 2012 [3] etc.)
- Benutzerdefinierte oder aus Akzelerogrammen generierte Antwortspektren
- Ansatz von richtungsbezogenen Antwortspektren
- Verschiedene Antwortspektren können verschiedenen Lagern zugeordnet werden (Multi-punkt-Option)

- Relevante Eigenformen für das Antwortspektrum können manuell oder automatisch ausgewählt werden (die 5%-Regel aus dem EC 8 kann angewendet werden)
- Die Berechnung wird in *RF-DYNAM Pro* durchgeführt und ist daher linear
- Kombination der Modalantworten (SRSS-Regel oder CQC-Regel) und Kombination der Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen (SRSS- oder 100% / 30%-Regel)

Die Ergebnisse aus dem Zeitverlaufsverfahren werden in einem Zeitverlaufsdiagramm angezeigt. Hierbei ist es möglich, die Ergebnisse verschiedener Knoten oder Positionen innerhalb eines Stabes zu überlagern. Alle Ergebnisse werden in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Zahlenwerte lassen sich in Excel exportieren. Beim Zeitverlaufsverfahren ist es möglich, die Ergebnisse eines einzelnen Zeitschritts zu exportieren oder die ungünstigsten Ergebnisse von allen Zeitschritten herauszufiltern. Bei einem Antwortspektrenverfahren werden nur die Ergebniskombinationen exportiert. Intern erfolgen dabei die Kombination der Modalantworten und die Kombination der Ergebnisse infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung.

Die Eingabedaten in *RF-DYNAM Pro* und die exportierten Lastfälle und Ergebniskombinationen sind Teil des Ausdruckprotokolls.

## Ersatzlasten

*RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* ist eine Erweiterung des RFEM Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen*. Mithilfe des multi-modalen Antwortspektrenverfahrens werden Erdbebenenanalysen durchgeführt. Die dazu benötigten Spektren können gemäß den Normen oder benutzerdefiniert erstellt werden. Daraus werden statische Ersatzlasten generiert.

- Antwortspektren zahlreicher Normen (EN 1998 [1], DIN 4149 [2], IBC 2012 [3] etc.)
- Eingabe benutzerdefinierter Antwortspektren
- Ansatz von richtungsbezogenen Antwortspektren
- Relevante Eigenformen für das Antwortspektrum können manuell oder automatisch ausgewählt werden (die 5%-Regel aus dem EC 8 kann angewendet werden)
- Generierte statische Ersatzlasten werden in Lastfälle exportiert, getrennt für jede Form und Richtung
- Die Berechnung dieser Lastfälle erfolgt in RFEM, daher kann eine nichtlineare Berechnung durchgeführt werden.
- Kombination der Modalantworten (SRSS-Regel) und Kombination der Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen (SRSS- oder 100% / 30%-Regel)

Statische Ersatzlasten werden getrennt für jeden relevanten Eigenwert und getrennt für jede Erregungsrichtung generiert. Diese werden in statische Lastfälle exportiert und es wird eine statische Analyse in RFEM durchgeführt. Diese Lastfälle werden anschließend in Ergebniskombinationen überlagert. Dabei erfolgt zuerst eine Kombination der modalen Ergebnisse. Danach werden die Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen kombiniert.

Die Eingabedaten in *RF-DYNAM Pro* und die exportierten Lastfälle und Ergebniskombinationen sind Teil des Ausdruckprotokolls.

## 1.2 RF-DYNAM Pro Team

An der Entwicklung von *RF-DYNAM Pro* waren beteiligt:

### Programmkoordinierung

Dipl.-Ing. Georg Dlubal  
Dipl.-Ing. (FH) Younes El Frem  
Ing. Pavel Bartoš

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert  
Dipl.-Ing. Stefan Frenzel

### Programmierung

Doc. Dr.-Ing. Ivan Němec  
Dr.-Ing. Radoslav Rusina  
Dr.-Ing. Zbyněk Vlk  
Dr.-Ing. Ivan Ševčík  
Ing. Petr Horák  
Ing. Radek Dubina

Ing. Jiří Buček  
Ondřej Vydra  
Ján Juranko  
Michal Zelenka  
Ing. Michal Brabec  
RNDr. Jan Gregor

### Programmdesign

Dipl.-Ing. Georg Dlubal  
MgA. Robert Kolouch

Ondřej Vydra

### Programmkontrolle

M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler  
M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier  
Ing. Jonáš Bartoň

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert  
Dipl.-Ing. Stefan Frenzel

### Handbuch, Hilfesystem und Übersetzung

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert  
BSc Eng Chelsea Jennings  
M.A. Melanie Most  
Dipl.-Ü. Gundel Pietzcker  
Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl  
Oliver Vogl  
Ing. Nikola Tomšů  
Ing. Ladislav Kábrt  
Ing. Fabio Borriello  
Ing. Dmitry Bystrov  
Eng. Rafael Duarte

Ing. Jana Duníková  
Ing. Lara Caballero Freyer  
Ing. Ph.D. Alessandra Grosso  
Ing. Aleksandra Kociolek  
Eng. Nilton Lopes Fernandes  
Mgr. Ing. Hana Macková  
Ing. Téc. Ind. José Martínez Hernández  
Mgr. Petra Pokorná  
Ing. Michaela Prokopová  
Ing. Marcela Svitáková

### Technische Unterstützung und Endkontrolle

M.Eng. Cosme Asseya  
Dipl.-Ing. (BA) Markus Baumgärtel  
Dipl.-Ing. Moritz Bertram  
M.Sc. Sonja von Bloh  
Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß  
Dipl.-Ing. Frank Faulstich  
Dipl.-Ing. (FH) René Flori  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel

Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich  
Dipl.-Ing. (FH) Wieland Götzler  
Dipl.-Ing. Thomas Günthel  
Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Hawranke  
Dipl.-Ing. (FH) Paul Kieloch  
Dipl.-Ing. (FH) Bastian Kuhn  
Dipl.-Ing. (FH) Adrian Langhammer  
Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Lex

Dipl.-Ing. (BA) Sandy Matula  
 Dipl.-Ing. (FH) Alexander Meierhofer  
 M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier  
 M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler  
 M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert  
 Dipl.-Ing. (FH) Christian Stautner  
 Dipl.-Ing. (FH) Lukas Sühnel  
 Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

## 1.3 Gebrauch des Handbuchs

Themenbereiche wie Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck sind im Handbuch des Hauptprogramms RFEM ausführlich erläutert. Der Schwerpunkt dieses Handbuchs liegt auf den Besonderheiten, die sich im Rahmen der Arbeit mit dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro* ergeben.



Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnismasken des Moduls. Im Text sind die beschriebenen **Schaltflächen** in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Bearbeiten]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Masken und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, sodass die Erläuterungen gut im Handbuch und im Programm nachvollzogen werden können.

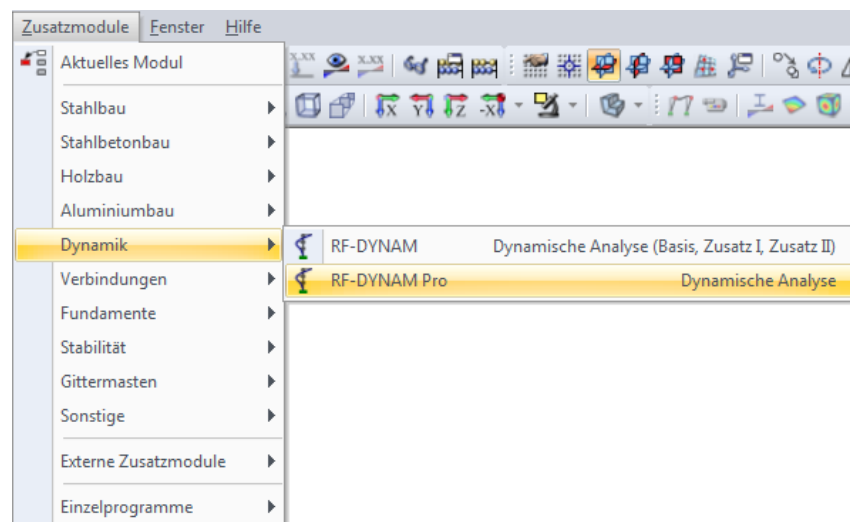
Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie dennoch nicht fündig werden, so können Sie unsere Website [www.dlubal.de](http://www.dlubal.de) nutzen, um auf den FAQ-Seiten das Problem nach bestimmten Kriterien einzugrenzen, aufgezeichnete Webinare anschauen oder die Beispiele durcharbeiten. Der *Dlubal Blog* ist auch sehr hilfreich. Diesen finden Sie unter [www.dlubal.com/blog/de](http://www.dlubal.com/blog/de).

## 1.4 RF-DYNAM Pro Modul starten

Es bestehen in RFEM folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro* zu starten.

### Menü

Um das Zusatzmodul zu starten, wählen Sie im RFEM-Menü **Zusatzmodule** → **Dynamik** → **RF-DYNAM Pro**, siehe [Bild 1.1](#).



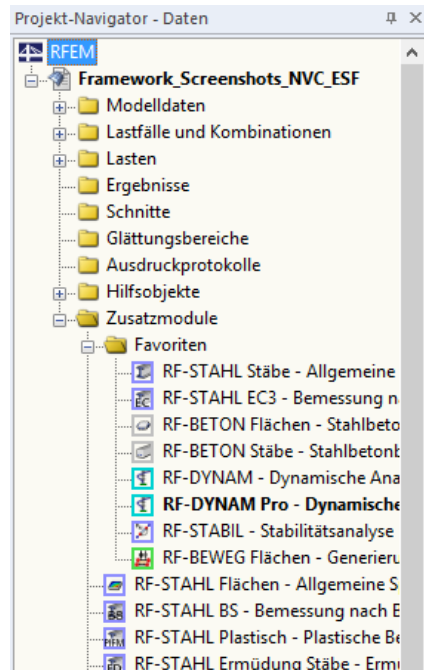
**Bild 1.1:** Menü **Zusatzmodule** → **Dynamik** → **RF-DYNAM Pro**, um das Modul *RF-DYNAM Pro* zu öffnen

Wenn *RF-DYNAM Pro* zuvor geöffnet war und Ihr aktuelles Modul ist, dann können Sie auch das Menü **Zusatzmodule** → **Aktuelles Modul** verwenden.

## Navigator

Alternativ rufen Sie das Zusatzmodul im *Daten-Navigator* durch Anklicken des Eintrags **Zusatzmodule** → **RF-DYNAM Pro** auf.

Mit einem Rechtsklick auf das Zusatzmodul können Sie es zu Ihren Favoriten hinzufügen. Der Projekt-Navigator ist in [Bild 1.2](#) dargestellt.



**Bild 1.2:** Daten-Navigator **Zusatzmodule** → **RF-DYNAM Pro**, um das Modul *RF-DYNAM Pro* zu öffnen

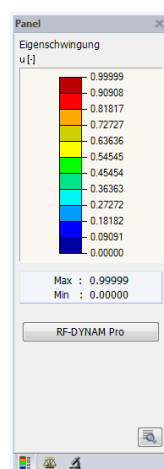
## Panel

Wenn schon Ergebnisse von *RF-DYNAM Pro* vorliegen, können Sie das Zusatzmodul auch über das Panel starten.



Um das Panel anzeigen zu lassen, wählen Sie den *RF-DYNAM Pro*-Fall aus dem Drop-Down-Menü im Hauptprogramm RFEM, machen Sie die Ergebnisse sichtbar mit [Ergebnisse anzeigen] und klicken auf die [Panel]-Schaltfläche.

Verwenden Sie die Schaltfläche [RF-DYNAM Pro] im Panel, um das Zusatzmodul wieder zu öffnen.



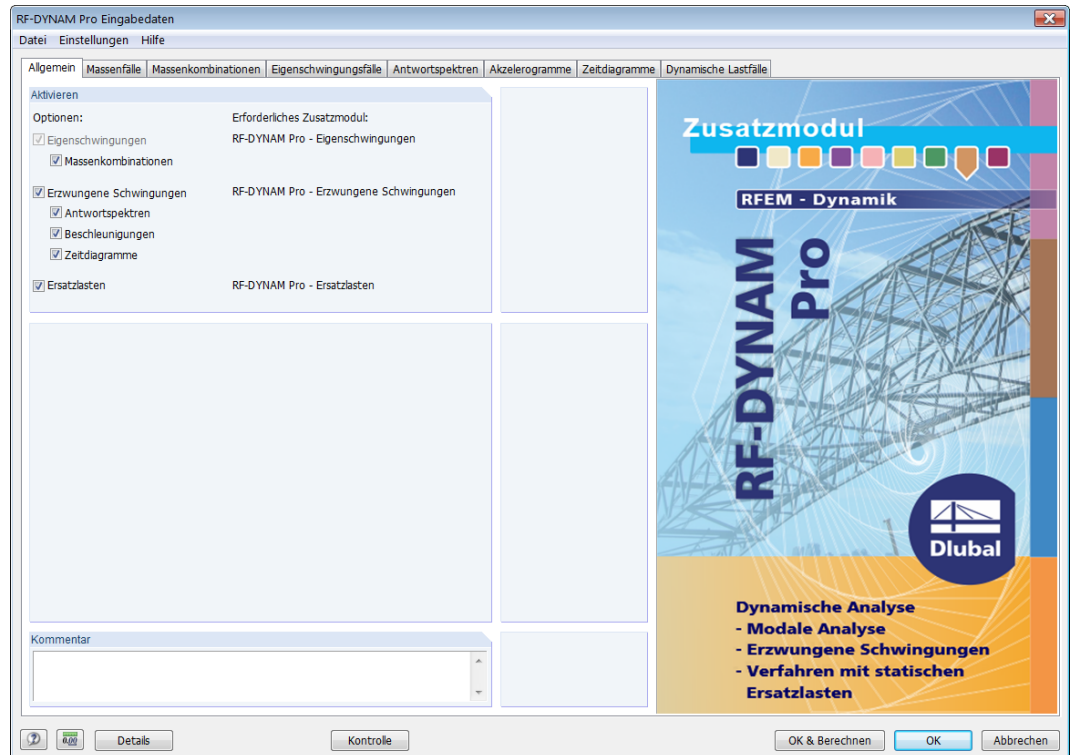
**Bild 1.3:** Panel mit der Schaltfläche [RF-DYNAM Pro], in [Bild 1.3](#) dargestellt, um das Zusatzmodul wieder zu öffnen.



## 2 Eingabedaten

Nach dem Aufruf des Zusatzmoduls erscheint ein neues Fenster. Das Fenster ist in verschiedene Register und Unterregister unterteilt. Die erstmalige Dateneingabe sollte daher immer von links nach rechts erfolgen. Nicht alle Register erscheinen gleich zu Beginn. Einige Register sind abhängig von bestimmten Einstellungen die erscheinen, sobald die entsprechenden Kontrollfelder angehakt wurden.

Das erste Fenster, das beim Öffnen des Moduls erscheint, ist in [Bild 2.1](#) dargestellt.



**Bild 2.1:** Maske *Allgemein*.

Im Register *Allgemein* wird festgelegt, ob nur Eigenschwingungen und Eigenformen des Modells analysiert werden sollen (*RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen*) oder ob die Antwort des Modells auf erzwungene Schwingungen untersucht werden soll (*RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*) oder ob Sie statische Ersatzlasten erzeugen möchten (*RF-DYNAM Pro Ersatzlasten*). Zusatzmodule, die nicht käuflich erworben wurden, können geöffnet werden, aber sind nur als Demoversion verfügbar. Sie können auch eine 30-tägige Testversion dieser Zusatzmodule aktivieren.

### Eigenschwingungen

Diese Option ist immer voreingestellt, da eine Eigenschwingungsanalyse der Struktur zwingend erforderlich ist. Die Register *Massenfälle* und *Eigenschwingungsfälle* sind bei dieser Option voreingestellt. Wenn das Kontrollfeld *Massenkombination* angeklickt wird, wird ein weiteres Register, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, angezeigt.

### Erzwungene Schwingungen

Mit diesem Modul kann entweder ein Antwortspektren- oder ein Zeitverlaufsverfahren durchgeführt werden. Wenn die *Beschleunigungen* ausgewählt werden, kann ein Antwortspektrum aus einem Beschleunigungs-Zeit-Diagramm erzeugt werden. Das Register *Antwortspektren* erscheint, wenn die *Antwortspektren* ausgewählt sind, das Register *Akzelerogramme* wird angezeigt, wenn

Beschleunigungen ausgewählt sind und das Register *Zeitdiagramme* erscheint, wenn *Zeitdiagramme* ausgewählt sind. Das Register *Dynamische Lastfälle* steht für alle drei Optionen des Moduls *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* zur Verfügung.

### Ersatzlasten

Mit dieser Option ist es möglich, statische Ersatzlasten in Übereinstimmung mit verschiedenen Bemessungsnormen (**EN 1998-1** [1], **IBC2012** [3] u.v.m.) zu erzeugen. Die Register *Antwortspektren* und *Dynamische Lastfälle* sind Teil des Moduls *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*.

### 2.1 Aufbau der Hauptregisterkarten

Die Fenster von *RF-DYNAM Pro* enthalten immer die folgenden Schaltflächen:



Die [Hilfe]-Schaltfläche führt direkt zum Handbuch und zur Online-Hilfe. Das Hilfe-System kann auch über **Hilfe** → ... oder durch Drücken der Funktionstaste [F1] aufgerufen werden.



Die Einheiten oder die Anzahl der Dezimalstellen der Eingabedaten oder Ergebnisse können direkt in der Maske *Einheiten und Dezimalstellen* geändert werden, so wie es auch im Hauptprogramm *RFEM* erfolgt. Diese Maske kann auch über das Menü **Einstellungen** → **Einheiten und Dezimalstellen...** aufgerufen werden. Eine genaue Erläuterung dazu erfolgt in den [Abschnitten 2.10](#) und [4.6](#).

Details

Im Dialog *Details* werden allgemeine Einstellungen festgelegt, die für die gesamte dynamische Berechnung, die in *RF-DYNAM Pro* durchgeführt wird, gelten. Der Dialog kann auch über **Einstellungen** → **Details** aufgerufen werden. Diese Einstellungen werden im [Abschnitt 2.9](#) erklärt.

Kontrolle

Die Eingabedaten werden mit [Kontrolle] geprüft. Daraufhin wird keine Berechnung durchgeführt und die Maske bleibt geöffnet.

OK & Berechnen

Um die Berechnung zu starten und das Modul *RF-DYNAM Pro* zu verlassen, erfolgt ein Klick auf die Schaltfläche [OK & Berechnen].

OK

Mit [OK] werden die Eingabedaten gespeichert, aber es wird keine Berechnung durchgeführt. Dadurch wird das Modul *RF-DYNAM Pro* beendet und man befindet sich nun im Hauptprogramm.

Abbrechen

Mit [Abbrechen] wird das Zusatzmodul beendet, ohne dass die Daten gespeichert werden.

Wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, sind die verfügbaren Register *Allgemein*, *Massenfälle*, *Massenkombinationen*, *Eigenschwingungsfälle*, *Antwortspektren*, *Akzelerogramme*, *Zeitdiagramme* und *Dynamische Lastfälle*. Außer das Register *Allgemein* sind alle Hauptfenster ähnlich aufgebaut. Das wird in [Bild 2.2](#) anhand des Registers *Massenfälle* erklärt.

Auf der linken Seite eines jeden Fensters gibt es eine Liste bestehender Fälle und die Beschreibung dazu. Dies ist in [Bild 2.2](#) orange eingerahmt. Das können zum Beispiel *Massenfälle*, *Massenkombinationen* oder *Eigenschwingungsfälle* sein.



Am Ende dieser Liste, rot eingerahmt in [Bild 2.2](#), gibt es Schaltflächen, um neue Fälle anzulegen, bestehende Fälle zu kopieren oder diese zu löschen.



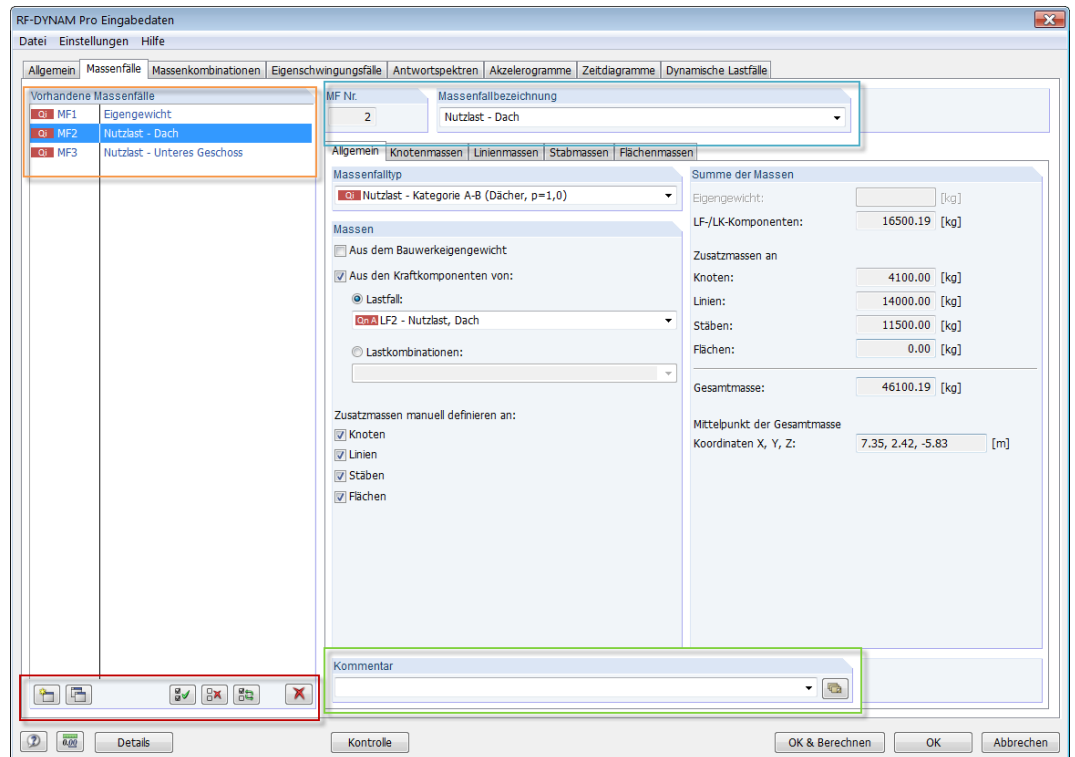
Mit diesen Schaltflächen ist es möglich, alle Fälle auszuwählen, die Auswahl aufzuheben oder umzukehren.

Auf der rechten Seite des Hauptfensters befindet sich oben die Nummer des ausgewählten Falls zusammen mit der Fallbezeichnung, in [Bild 2.2](#) blau eingerahmt. In dem Bezeichnungsfeld kann die Fallbezeichnung händisch eingetragen werden oder es kann eine Bezeichnung aus der Drop-Down-Liste ausgewählt werden. Darunter befinden sich die Haupteingabefelder für die Daten. Hier ist zunächst das Unterregister *Allgemein* geöffnet. Möglicherweise werden mehr Unterregister angezeigt. Das hängt jedoch von den ausgewählten Kontrollfeldern ab.

Im Unterregister *Allgemein* gibt es die Möglichkeit Kommentare einzutragen; dieses Feld ist in [Bild 2.2](#) grün eingerahmt.

## 2.2 Massenfälle

In *RF-DYNAM Pro* können mehrere *Massenfälle* definiert werden. Die Maske *Massenfall* ist in [Bild 2.2](#) dargestellt.



**Bild 2.2:** Maske *Massenfälle* mit geöffnetem Register *Allgemein*. Der MF2 ist ausgewählt und alle vier Optionen zum Definieren zusätzlicher Massen sind angehakt, um die erscheinenden Unterregister anzuzeigen.

Die Massenfallnummer wird automatisch erzeugt und kann nicht verändert werden. Falls ein Massenfall später gelöscht wird, ändert sich die Nummerierung nicht. Eine Bezeichnung kann händisch eingetragen oder aus der Drop-Down-Liste ausgewählt werden.

### Massenfalltyp

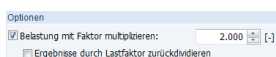
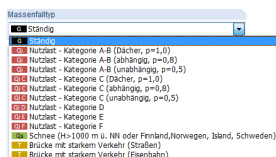
Es wird ein Massenfalltyp aus der Drop-Down-Liste gewählt. Das ist insbesondere von Bedeutung, wenn *Massenkombinationen* verwendet werden (siehe [Abschnitt 2.3](#)). Kombinationsfaktoren sind dann gemäß **EC0** [4] und **EC8** [1] voreingestellt.

### Massen

Das Kontrollfeld *Aus dem Bauwerkeigengewicht* wird ausgewählt, wenn das Eigengewicht berücksichtigt werden soll, unabhängig von einem in *RFEM* definierten Lastfall. Diese Option ist in [Bild 2.2](#) dargestellt.

Massen aus einem Lastfall oder einer Lastkombination (in *RFEM* definiert) können durch Aktivieren des Kontrollfeldes *Aus den Kraftkomponenten von Lastfall / Lastkombinationen* importiert werden. Für den Import eines Lastfalls oder einer Lastkombination wird der entsprechende Eintrag im Drop-Down-Menü ausgewählt.

Der Lastfaktor zum Multiplizieren der Belastung in Lastfällen, der in den Berechnungsparametern von *RFEM* festgelegt werden kann, wird nicht in *RF-DYNAM Pro* übernommen. Um die Massen um einen Faktor zu erhöhen, können *Massenkombinationen* verwendet werden, die in [Abschnitt 2.3](#) beschrieben sind.





Wenn ein Lastfall importiert wird, der das Bauwerkeigengewicht enthält, muss das Kontrollfeld 'Aus dem Bauwerkeigengewicht' in *RF-DYNAM Pro* deaktiviert werden. Anderenfalls wird das Bauwerkeigengewicht verdoppelt.



Unter **Einstellungen** → **Details** kann festgelegt werden, ob Volllasten oder nur die *Z*-Komponenten der Lasten in beide *Z*-Richtungen oder nur in Richtung der Schwerkraft importiert werden. Der Dialog *Details* wird in [Abschnitt 2.9](#) erklärt.

Zusätzlich oder alternativ zu den bisher beschriebenen Optionen zum Import von Massen ist es möglich, Knoten-, Linien-, Stab- oder Flächenmassen festzulegen. Abhängig von den ausgewählten Kontrollfeldern sind weitere Unterregister verfügbar, die in [Bild 2.2](#) dargestellt sind. Die Einstellungen innerhalb dieser Unterregister werden detailliert in den [Abschnitten 2.2.1](#) und [2.2.2](#) beschrieben.

### Summe der Massen

Auf der rechten Seite in der Maske wird die Summe der Massen angegeben, um noch einmal die Eingabe von Eigengewicht, importierten Massen aus Lastfällen oder Lastkombinationen und zusätzlichen Massen zu kontrollieren. Die Gesamtmasse und der daraus resultierende Schwerpunkt der Masse werden angezeigt.

### 2.2.1 Zusätzliche Knotenmassen

Das Register Knotenmassen ist in [Bild 2.3](#) dargestellt.

Allgemein Knotenmassen Linienmassen Stabmassen Flächenmassen						
Zusatzmassen der Knoten						
Nr.	Liste der Knoten	Masse $m$ [kg]	Massenträgheitsmoment			Kommentar
			$I_x$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$I_y$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$I_z$ [kg·m <sup>2</sup> ]	
1	2,5,8,19,22,33,	500.00	0.00	0.00	0.00	
2	4	100.00	900.00	0.00	0.00	
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						

Σ 4100.00 [kg]

**Bild 2.3:** Maske *Knotenmassen*, die angezeigt wird, wenn *Zusatzmassen an Knoten* im Register *Allgemein* ausgewählt werden.



Sie können eine Liste von Knoten händisch erstellen oder die auf der linken Seite dargestellte Schaltfläche [Mehrfachselektion] verwenden, um Knoten in der Grafik auszuwählen.

Die Massen  $m$  [kg] können nur händisch festgelegt werden und wirken in den Richtungen, die in den *Eigenschwingungsfällen* definiert wurden (siehe [Abschnitt 2.4](#)).

Darüber hinaus können Massenträgheitsmomente  $I_x$ ,  $I_y$  und  $I_z$  angegeben werden, um komplexere Massenpunkte zu modellieren (*d.h.*, die Drehbewegungen einer Maschine können annähernd berücksichtigt werden).

Die Schaltflächen am Ende der Tabelle bieten nützliche Funktionen, die im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 11.5** beschrieben sind.



Der Tabelleneintrag kann in einer Bibliothek gespeichert und jederzeit aufgerufen werden. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um einen Dateinamen einzugeben.

### 2.2.2 Zusätzliche Linien-, Stab- und Flächenmassen

Zusätzlich zu Knotenmassen können Linien- Stab- oder Flächenmassen händisch festgelegt werden. Die entsprechenden Unterregister erscheinen, wenn die Kontrollfelder *Linien*, *Stäbe* oder *Flächen* im Register *Massenfälle* ausgewählt sind, wie in **Bild 2.2** dargestellt. Die Tabelle zum Eintragen der Linienmassen ist in **Bild 2.4** dargestellt.

Allgemein Knotenmassen Linienmassen Stabmassen Flächenmassen			
Zusatzmassen der Linien			
Nr.	Liste der Linien	Masse [kg/m]	Kommentar
1	2,6,12,42,54,86,98	500.00	
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
		Σ 14000.00 [kg]	

**Bild 2.4:** Maske *Linienmassen*, die angezeigt wird, wenn *Zusatzmassen an Linien* im Register *Allgemein* ausgewählt werden.

Die Tabellen zum Eintragen von Stab- und Flächenmassen sind sehr ähnlich aufgebaut und werden hier nicht explizit dargestellt.



Eine Liste von Linien (Stäben oder Flächen) kann händisch erstellt werden oder die auf der linken Seite dargestellte Schaltfläche [Mehrfachselektion] kann verwendet werden, um Linien (Stäbe oder Flächen) grafisch auszuwählen.

Linien- und Stabmassen werden in *kg* pro Längeneinheit angegeben. Flächenmassen werden in *kg* pro Flächeneinheit angegeben. Sie können nur händisch festgelegt werden und wirken in den Richtungen, die in den *Eigenschwingungsfällen* definiert wurden (siehe **Abschnitt 2.4**).



Massen werden nur in die Translationsrichtungen berücksichtigt, wenn eine diagonale Massenmatrix für die Berechnung ausgewählt wird (ausgenommen sind die Massenträgheitsmomente wie in **Abschnitt 2.2.1** erläutert). Eine Rotation um die Längsachse einer Linie oder eines Stabes wird berücksichtigt, wenn eine diagonale Massenmatrix mit Torsionselementen ausgewählt ist. Nur mit der konsistenten Massenmatrix können Massen in Translations- und Rotationsrichtungen wirken. Weitere Informationen zu Massenmatrizen gibt es in **Abschnitt 2.4**.

## 2.3 Massenkombinationen

Massenfälle können zu Massenkombinationen kombiniert werden. Das erfolgt analog zu Lastfällen und Lastkombinationen im Hauptprogramm *RFEM*, wie im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 5.5.1** beschrieben. Das Register *Massenkombinationen* ist nur verfügbar, wenn das entsprechende Kontrollfeld im Register *Allgemein* ausgewählt ist (siehe [Bild 2.1](#)). Wenn das Register *Massenkombinationen* zum ersten Mal geöffnet wird, ist eine Massenkombination voreingestellt und die bestehenden Massenfälle werden aufgeführt.

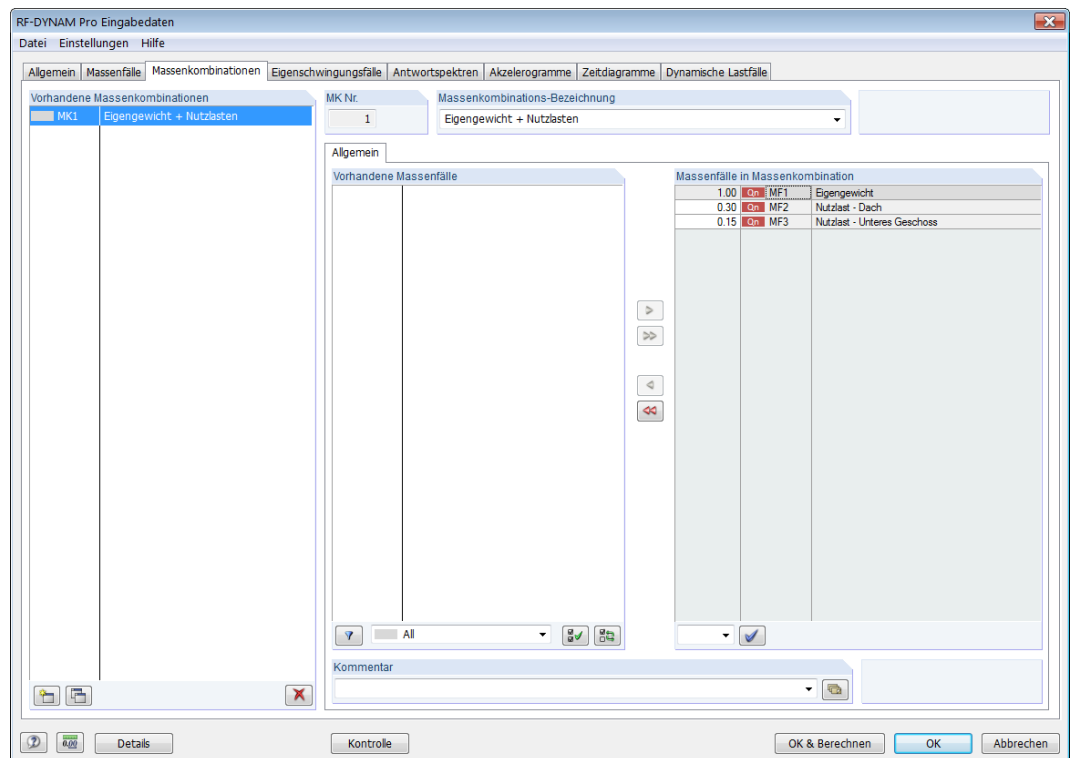


Mit den Schaltflächen auf der linken Seite lassen sich selektierte oder alle Massenfälle zu einer Massenkombination hinzufügen. Die Massenfällen werden damit von der linken in die rechte Liste übertragen. Kombinationsfaktoren sind in *RF-DYNAM Pro* automatisch voreingestellt, aber können händisch geändert werden.

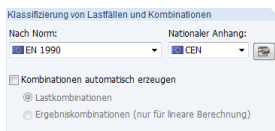


Genauso ist es möglich, einzelne oder alle Massenfälle von einer Massenkombination zu entfernen, indem die Schaltflächen, wie links gezeigt, verwendet werden.

Die Maske mit der Massenkombination *MK1*, die Massenfälle mit Eigengewicht und Nutzlast enthält, ist in [Bild 2.5](#) dargestellt.



**Bild 2.5:** Maske *Massenkombinationen* mit allen vorhandenen Massenfällen, die für die Massenkombination ausgewählt wurden. Die Kombinationsfaktoren sind in *RF-DYNAM Pro* voreingestellt.



Kombinationsfaktoren sind gemäß **EC0** [4] und **EC8** [1] voreingestellt. Diese Faktoren können manuell angepasst werden, indem ein Wert eingetragen oder aus der Drop-Down-Liste ausgewählt wird. Wie in **EN 1998-1** in **Abschnitt 3.2.4** [1] festgelegt, müssen Zusatzmassen neben dem Eigengewicht berücksichtigt werden, um Trägheitseffekte zu berechnen.

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.1)$$

wobei  $G_{k,j}$  ständigen Lasten und  $Q_{k,i}$  Nutzlasten sind.  $\psi_{E,i}$  sind die Kombinationsfaktoren für die Nutzlasten, definiert als

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} \quad (2.2)$$

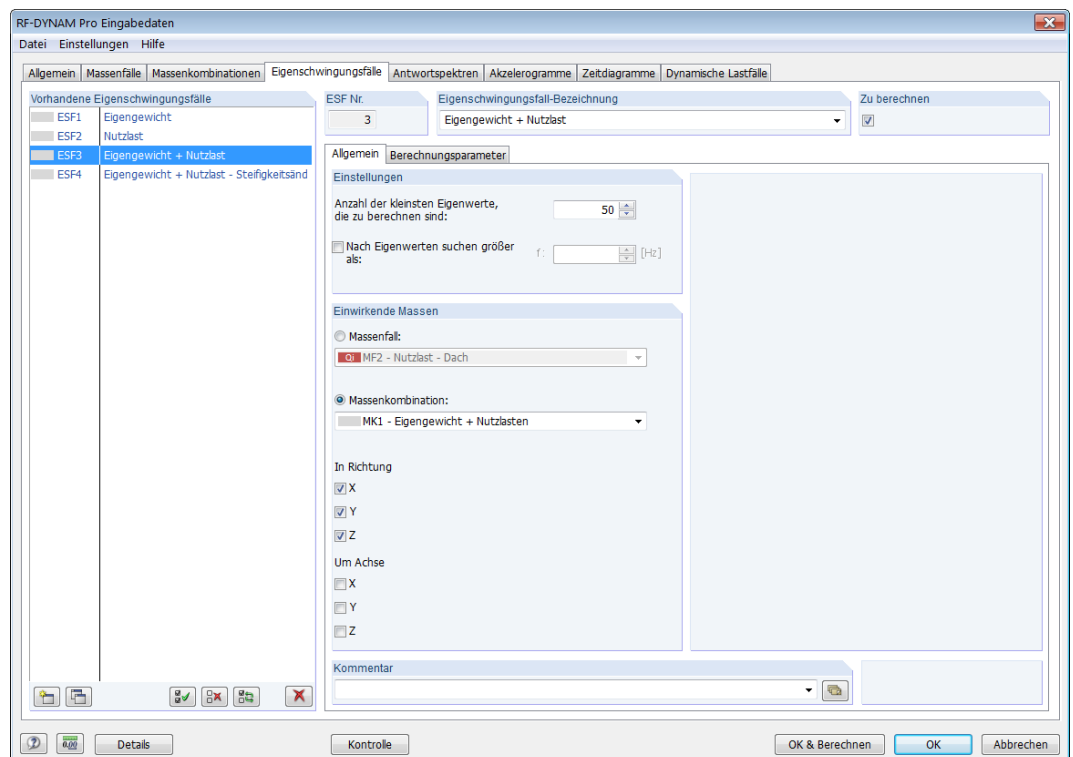
wobei  $\psi_{2,i}$  in **EN1990 Tabelle A.1.1** [4] und  $\varphi$  in **EN 1998-1 Abschnitt 4.2.4** [1] festgelegt sind.

Diese Kombinationsfaktoren können in jedem nationalen Anhang des **EC8** und in anderen internationalen Baunormen unterschiedlich geregelt sein.

### 2.4 Eigenschwingungsfälle

Das Register *Eigenschwingungsfälle* ist das Kernstück des Moduls *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* und ist eine wichtige Grundlage für die zwei Zusatzmodule. Hier wird eingestellt, wieviele Eigenwerte berechnet werden sollen, es wird definiert, welche Massen verwendet werden und in welche Richtung sie wirken. Hier wird auch der Eigenwertlöser und die Art von Massenmatrix festgelegt sowie die Skalierung der Eigenformen vorgenommen. In diesem Register wird jegliche Steifigkeitsänderung definiert oder Normalkräfte als Anfangsbedingung importiert.

Das Register *Allgemein* in der Maske *Eigenschwingungsfall* ist in [Bild 2.6](#) dargestellt.

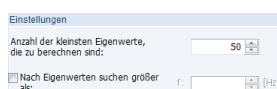
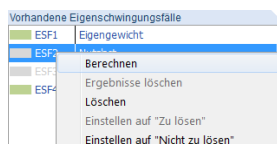


**Bild 2.6:** Maske *Eigenschwingungsfälle* mit dem geöffneten Register *Allgemein*.

Für jeden *Eigenschwingungsfall* können verschiedene Berechnungsparameter festgelegt werden, wie in [Bild 2.7](#) dargestellt.

Die Nummer des *Eigenschwingungsfalles* wird automatisch erzeugt und kann nicht verändert werden. Falls ein Fall später gelöscht wird, ändert sich die Nummerierung nicht. Es kann festgelegt werden, ob der spezifische *Eigenschwingungsfall* durch Auswählen oder Aufheben des Kontrollfeldes *Zu berechnen* berechnet wird oder nicht.

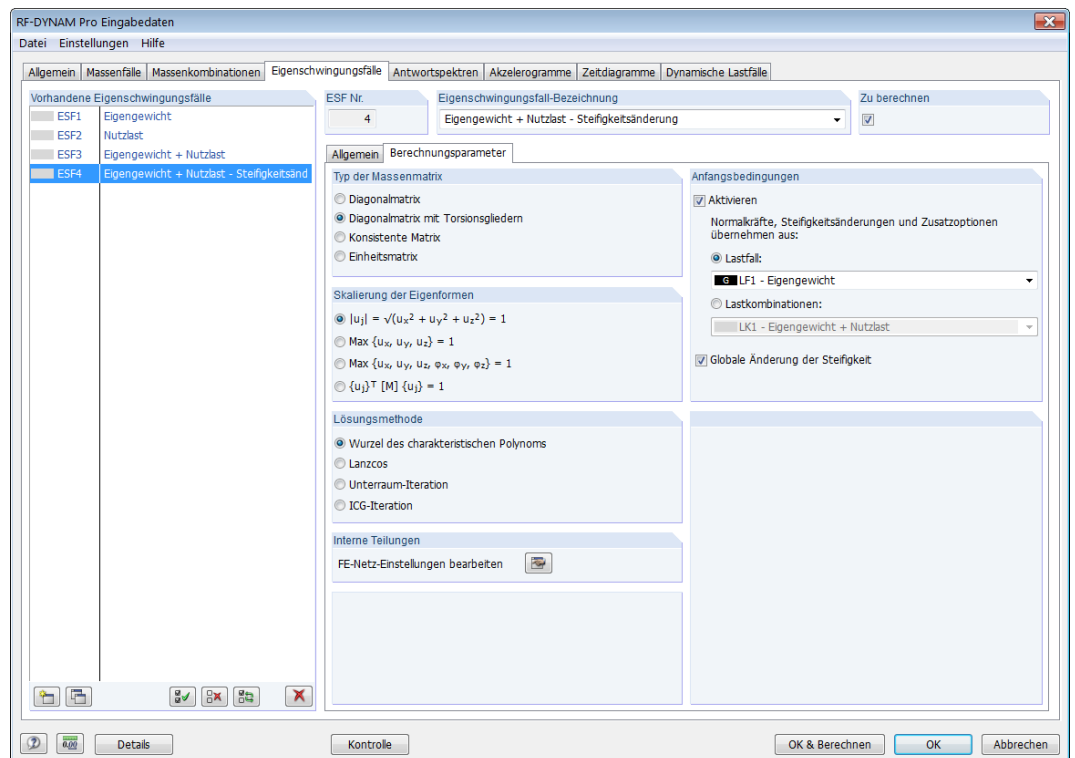
Es kann jeder *Eigenschwingungsfall* separat berechnet werden, indem das Kontextmenü verwendet wird und *Berechnen* ausgewählt wird. Die Farbe eines *ESF* wird grau dargestellt, wenn keine Ergebnisse dieses *ESF* verfügbar sind und verändert sich zu grün, sobald die Berechnung abgeschlossen ist und Ergebnisse verfügbar sind, mehr Informationen finden Sie im [Abschnitt 3.3](#).



#### 2.4.1 Anzahl der Eigenwerte

Im Register *Allgemein* werden die Anzahl der kleinsten Eigenwerte festgelegt, die zu berechnen sind. Die maximale Anzahl an Eigenwerten ist auf 9999 in *RF-DYNAM Pro* beschränkt, aber auch durch das Modell an sich. Die Anzahl der verfügbaren Eigenwerte entspricht den Freiheitsgraden





**Bild 2.7:** Maske *Eigenschwingungsfälle* mit dem geöffneten Register *Berechnungsparameter*.

(Anzahl der freien Massenpunkte multipliziert mit der Anzahl der Richtungen, in die die Massen wirken).

Es ist möglich, Eigenwerte nur oberhalb eines bestimmten Wertes der Eigenfrequenz  $f$  zu berechnen, um die Anzahl der erzeugten Ergebnisse zu reduzieren.



Die Auswahl dieser Option sollte gut überlegt sein und es ist ratsam, erst die kleinsten Eigenwerte der Struktur zu untersuchen. Um die Wichtigkeit von jedem Eigenwert einzuschätzen, sind die *Effektiven Modalmassenfaktoren* hilfreich (siehe [Abschnitt 4.1](#)).

### 2.4.2 Einwirkende Massen

Für jeden *Eigenschwingungsfall* können verschiedene *Massenfälle* oder *Massenkombinationen* importiert werden. Die Auswahl wird im Drop-Down-Menü im Register *Allgemein* vorgenommen.

In Richtung	Um Achse
<input checked="" type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> X
<input checked="" type="checkbox"/> Y	<input checked="" type="checkbox"/> Y
<input checked="" type="checkbox"/> Z	<input checked="" type="checkbox"/> Z

Die Richtungswirkung der Massen muss festgelegt werden. Die Massen können in globaler translatorischer  $X$ ,  $Y$ , oder  $Z$ -Richtung wirken, indem die entsprechenden Kontrollfelder angehakt werden. Massen können rotierend um die globale  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ -Achse wirken, indem die entsprechenden Kontrollfelder angehakt werden.



Diese Einstellungen ändern die Massenmatrix und führen zu verschiedenen Eigenformen und Eigenfrequenzen. Um eine ebene Analyse der Struktur durchzuführen, aktiviert man nur die Massen in eine der globalen Richtungen. Eine ebene Analyse ist nur bei regelmäßigen Gebäuden in Grund- und Aufriss zulässig. Für eine dreidimensionale Analyse werden Massen in alle globalen Richtungen berücksichtigt. Nur wenn Rotationseigenformen von Interesse sind, sollten rotierende Massen berücksichtigt werden.



Rotierende Massen werden nur berücksichtigt, wenn als Typ der Massenmatrix *Diagonalmatrix mit Torsionsgliedern* oder *Konsistente Matrix* eingestellt ist. Wenn die diagonale Massenmatrix verwendet wird, hat die Aktivierung von *Um Achse* keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Nur Trägheitsmomente an Knoten (siehe [Abschnitt 2.2.1](#)) werden berücksichtigt.



### 2.4.3 Typ der Massenmatrix

#### Typ der Massenmatrix

- ☐ Diagonalmatrix
- ☒ Diagonalmatrix mit Torsionsgliedern
- ☐ Einheitsmatrix

Vier verschiedene Typen von Massenmatrizen sind im Register *Berechnungsparameter* verfügbar, wie in [Bild 2.7](#) dargestellt.

**Diagonalmassenmatrix:** Wenn der Typ der Massenmatrix  $\mathbf{M}$  als diagonal festgelegt wird, befinden sich die Massen konzentriert an den FE-Knoten. Die Eingaben in der Matrix sind die Massen, die an jedem FE-Knoten in die Richtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  wirken. Massen, die um die  $X$ ,  $Y$  oder  $Z$ -Achse rotieren, werden vernachlässigt, auch wenn die Kontrollfelder bei *Um Achse* im Register *Allgemein* angehakt sind. Nur Massenträgheitsmomente  $I_x$ ,  $I_y$  und  $I_z$ , wie in der Tabelle *Knotenmassen* angegeben, werden berücksichtigt. Die Diagonalmassenmatrix  $\mathbf{M}$  setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\mathbf{M} = \text{diag} (M_{1,X}, M_{1,Y}, M_{1,Z}, I_{1,X}, I_{1,Y}, I_{1,Z}, M_{2,X}, \dots, I_{2,X}, \dots, M_{n,j}, \dots, I_{n,j}) \quad (2.3)$$

mit  $n = 1 \dots$  FE-Knoten sowie  $j = X, Y$  und  $Z$  Richtungen.

**Diagonalmassenmatrix mit Torsionselementen:** Diese Matrix ist immer noch eine Diagonalmatrix, bei der die Massen sich konzentriert an den FE-Knoten befinden, aber die Massen, die um die Längsachse eines Stabes oder einer Fläche wirken, werden automatisch berücksichtigt, wenn die Massen, die um die  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ -Achse wirken, aktiviert sind. Die Richtung, die berücksichtigt wird, hängt von der lokalen Längsrichtung der Stäbe und Flächen ab. Die Diagonalmatrix  $\mathbf{M}$  an einem bestimmten FE-Punkt mit Masse  $m$  setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\mathbf{M} = m \cdot \text{diag} (1, 1, 1, Y^2 + Z^2, X^2 + Z^2, X^2 + Y^2) \quad (2.4)$$

mit  $X$ ,  $Y$  oder  $Z$  als Abstände zum Mittelpunkt der Gesamtmasse, angegeben im Register *Massenfälle* und in [Abschnitt 2.2](#) erläutert.

**Konsistente Massenmatrix:** Die konsistente Massenmatrix ist eine vollständige Massenmatrix der finiten Elemente; die Massen sind nicht einfach an den FE-Knoten konzentriert, sondern Ansatzfunktionen werden für eine realistischere Verteilung der Massen innerhalb der FE-Elemente verwendet. Mit der konsistenten Massenmatrix werden nichtdiagonale Einträge in der Matrix berücksichtigt, so dass Rotation der Massen allgemein berücksichtigt wird. Die konsistente Massenmatrix ist folgendermaßen aufgebaut (es werden die Ansatzfunktionen einfachheitshalber vernachlässigt):

$$\mathbf{M} = m \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y^2 + Z^2 & -XY & -XZ \\ 0 & 0 & 0 & -XY & X^2 + Z^2 & -YZ \\ 0 & 0 & 0 & -XZ & -YZ & X^2 + Y^2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

mit der Masse  $m$  und den Abständen  $X$ ,  $Y$  oder  $Z$  zum Mittelpunkt der Gesamtmasse, angegeben im Register *Massenfälle* und in [Abschnitt 2.2](#) erläutert.

**Einheitsmatrix:** Die *Einheitsmatrix* überschreibt alle vorher festgelegten Massen (siehe [Abschnitt 2.4.2](#)). Eine Einheitsmatrix ist eine konsistente Matrix, bei der alle diagonalen Stäbe 1 [kg] betragen. Bei der Verwendung der *Einheitsmatrix* wird die Masse an jedem FE-Punkt auf 1 kg gesetzt. Translationen und Rotationen der Massen werden berücksichtigt. Dieser mathematische Ansatz sollte nur für numerische Analysen verwendet werden. Mehr Informationen zu Matrixtypen und vor allem zur Verwendung der Einheitsmatrix werden bei Barth und Rustler [5] angegeben.

## 2.4.4 Skalierung der Eigenformen

### Skalierung der Eigenformen

- ☒  $|u_j| = \sqrt{(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} = 1$
- ☐  $\text{Max}\{u_x, u_y, u_z\} = 1$
- ☐  $\text{Max}\{u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\} = 1$
- ☐  $\{u_j\}^T [M] \{u_j\} = 1$

Die Eigenformen können auf jeden beliebigen Wert skaliert werden. Die ersten drei Optionen eignen sich gut für die graphische Darstellung der Eigenformen. Die Option  $|u_j| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} = 1$  skaliert die Größe des Eigenformvektors  $u_j$  (nur translatorische Teile) auf 1. Die Option  $\text{max}\{u_x, u_y, u_z\} = 1$  wählt den maximalen translatorischen Anteil des Eigenformvektors und setzt ihn auf 1. Die Option  $\text{max}\{u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\} = 1$  berücksichtigt den ganzen Eigenformvektor, einschließlich der Rotationsteile, wählt das Maximum und setzt dieses auf 1. Für alle drei Optionen wird die Skalierung einzeln für jeden Eigenwert  $j$  vorgenommen.

Die Option  $u_j^T M u_j = 1 \text{ kg}$  wird immer intern für das Zeitverlaufs- oder Antwortspektrenverfahren verwendet, unabhängig von der hier getroffenen Auswahl. Die Modalmassen  $m_j$  betragen  $1 \text{ kg}$  für jeden Eigenwert, wenn diese Skalierungsoption verwendet wird (siehe [Abschnitt 4.1](#)).

Egal welche Skalierungsoption verwendet wird: Die translatorischen Eigenformen  $u_x, u_y$  und  $u_z$  sind dimensionslos und die Rotationseigenformen  $\varphi_x, \varphi_y$  und  $\varphi_z$  sind in  $[1/m]$  angegeben. Die daraus resultierenden Eigenformen werden in [Abschnitt 4.1](#) erläutert.

## 2.4.5 Eigenwertlöser

### Lösungsmethode

- ☒ Wurzel des charakteristischen Polynoms
- ☐ Lanczos
- ☐ Unterraum-Iteration
- ☐ ICG-Iteration

Es sind verschiedene Methoden verfügbar, um das Eigenwertproblem zu lösen. Die Auswahl richtet sich nach der Größe des zu berücksichtigenden Tragsystems und ist mehr eine Frage der Performance als der Genauigkeit. Die Methoden sind alle geeignet zur Bestimmung von genauen Eigenwerten.

**Wurzel des charakteristischen Polynoms:** Das ist die analytische Lösung eines Eigenwertproblems, siehe zum Beispiel [\[6\]](#) oder [\[7\]](#) und wird mit einer direkten Methode gelöst. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, dass höhere Eigenwerte genauer berechnet werden und dass alle Eigenwerte einer Struktur bestimmt werden können. Für größere Strukturen kann diese Methode recht langsam sein.

**Lanczos-Methode:** Die Lanczos-Methode ist eine iterative Methode, um die  $p$ -niedrigsten Eigenwerte und dazugehörige Eigenformen von größeren Strukturen zu bestimmen. In den meisten Fällen wird durch diesen Algorithmus eine schnelle Konvergenz erreicht. Es können  $n - 1$  Eigenwerte ( $n = \text{Freiheitsgrade der Struktur}$ ) berechnet werden. Für weitere Informationen siehe Bathe [\[6\]](#).

**Unterraum-Iteration:** Die Unterraum-Iteration ist für große FE-Modelle geeignet, bei denen nur einige Eigenwerte berechnet werden sollen. Alle benötigten Eigenwerte werden in einem Schritt bestimmt. Der Computerspeicher schränkt die Anzahl der Eigenwerte ein, die mit dieser Methode berechnet werden können. Für weitere Informationen siehe Bathe [\[6\]](#).

**ICG-Iteration:** Diese Methode ist auch für große Strukturen geeignet, bei denen nur wenige Eigenwerte benötigt werden. Jedoch werden hier die Eigenwerte nacheinander berechnet. Deswegen ist die Anzahl an benötigten Eigenwerten proportional zur Berechnungszeit. Theoretisch können alle Eigenwerte einer Struktur berechnet werden.

## 2.4.6 FE-Netz-Einstellungen

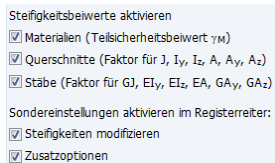
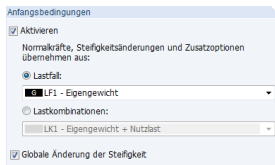
### Interne Teilungen

FE-Netz-Einstellungen bearbeiten



Mit der auf der linken Seite dargestellten Schaltfläche kommt man direkt zu den FE-Netz-Einstellungen des Hauptprogramms *RFEM*. Die Maske *FE-Netz-Einstellungen* kann auch über **Berechnung** → **FE-Netz-Einstellungen...** im Hauptprogramm *RFEM* aufgerufen werden. Weitere Informationen zum FE-Netz und zu den Parametern, die angepasst werden können, stehen im *RFEM-Handbuch* in [Abschnitt 7.2](#).

## 2.4.7 Steifigkeitsänderungen und Normalkräfte als Anfangsbedingungen



Normalkräfte, Steifigkeitsänderungen und zusätzliche Optionen, wie in einem Lastfall oder einer Lastkombination festgelegt, werden als Anfangsbedingung in *RF-DYNAM Pro* importiert, wenn die *Anfangsbedingungen* in [Bild 2.6](#) aktiviert sind.

Die *Globalen Änderungen der Steifigkeit* sind nur verfügbar, wenn kein Lastfall importiert wird oder wenn der importierte Lastfall oder die importierte Lastkombination keine Steifigkeitsänderungen enthält. *Globale Änderungen der Steifigkeit* importieren den Material-Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$ , wie in der Maske *Material bearbeiten* im Hauptprogramm *RFEM* festgelegt (siehe **RFEM-Handbuch Abschnitt 4.3**), die Querschnittsänderungen wie in der Maske *Querschnitt bearbeiten* im Hauptprogramm *RFEM* festgelegt (siehe **RFEM-Handbuch Abschnitt 4.13**) und die Steifigkeitsänderungen an Stäben wie in der Maske *Stäbe bearbeiten* festgelegt (siehe **RFEM-Handbuch Abschnitt 4.17**).

Die *Berechnungsparameter* eines Lastfalls oder einer Lastkombination, die die Steifigkeit ändern, sind auf der linken Seite dargestellt. Die Kontrollfelder *Materialien*, *Querschnitte* und *Stäbe* aktivieren die Änderungen, die in den Masken *Material*, *Querschnitt* und *Stab bearbeiten* vorgenommen wurden (wie oben beschrieben, analog zu den *Globalen Änderungen der Steifigkeit*). Bei der Auswahl von *Steifigkeiten ändern* öffnet sich ein neues Register in der Maske *Berechnungsparameter*, in dem Faktoren für Materialien, Querschnitte, Lager und Gelenke eingegeben werden können. Zusätzlich können Stäbe, Flächen und Volumen deaktiviert werden, damit wird das statische Modell geändert, das in *RF-DYNAM Pro* importiert wird. Wenn *Zusatzoptionen* ausgewählt sind, kann die Steifigkeit aus dem Zusatzmodul *RF-BETON* importiert werden. Weitere Informationen zu den Berechnungsparametern von Lastfällen gibt es im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 7.3**.

Normalkräfte und auch ausfallende Lager, Stäbe, Flächen oder Volumina werden automatisch importiert (ohne Steifigkeiten in den *LFs* / *LKs* zu modifizieren), sobald die *Anfangsbedingungen* ausgewählt werden und der entsprechende Lastfall oder die entsprechende Lastkombination importiert wird.

Zusammenfassend gesagt importiert *RF-DYNAM Pro* die Steifigkeitsmatrix eines Statikmodells, nachdem der Lastfall oder die Lastkombination in *RFEM* berechnet wurde. Dies ist eine Anfangsbedingung für die Eigenwertanalyse in *RF-DYNAM Pro*, die Berechnung an sich ist noch immer linear. Mit dieser Option können näherungsweise nichtlineare Effekte wie zum Beispiel ausfallende Stäbe, Lager oder Gelenke berücksichtigt werden. Wenn keine Ergebnisse für den Lastfall oder die Lastkombination vorhanden sind, erfolgt die Berechnung automatisch vor der *RF-DYNAM Pro*-Modulberechnung.



Sollen nur Normalkräfte berücksichtigen werden (zum Beispiel Vorspannung an Seilen), ist darauf zu achten, dass keine Steifigkeitsänderungen in den Berechnungsparametern des importierten Lastfalls oder der importierten Lastkombination aktiviert sind.



Wenn nur bestimmte Steifigkeitsänderungen oder deaktivierte Stäbe untersucht werden sollen, ist darauf zu achten, dass ein Lastfall angelegt wird, der keine Lasten, sondern nur relevante Steifigkeitsänderungen enthält.

Eine komplexe Abbildung dieses Leistungsmerkmals gibt es im *Dlubal Blog* (<https://www.dlubal.com/blog/16771/dlubal-rfem-5-rstab-8-import-von-normalkraeften-steifigkeitsaenderungen-und-zusatzoptionen-in-rf-dynam-pro-eigenschwingungen/>).

## 2.5 Antwortspektren

Ein Antwortspektrum stellt maximale Systemantworten von Einmassenschwingern (EMS) auf eine bestimmte Systemanregung dar. Normalerweise werden diese Systemantworten gegen die Eigenperiode von Einmassenschwingern (EMS) abgebildet. Erstellt werden diese durch Berechnung der

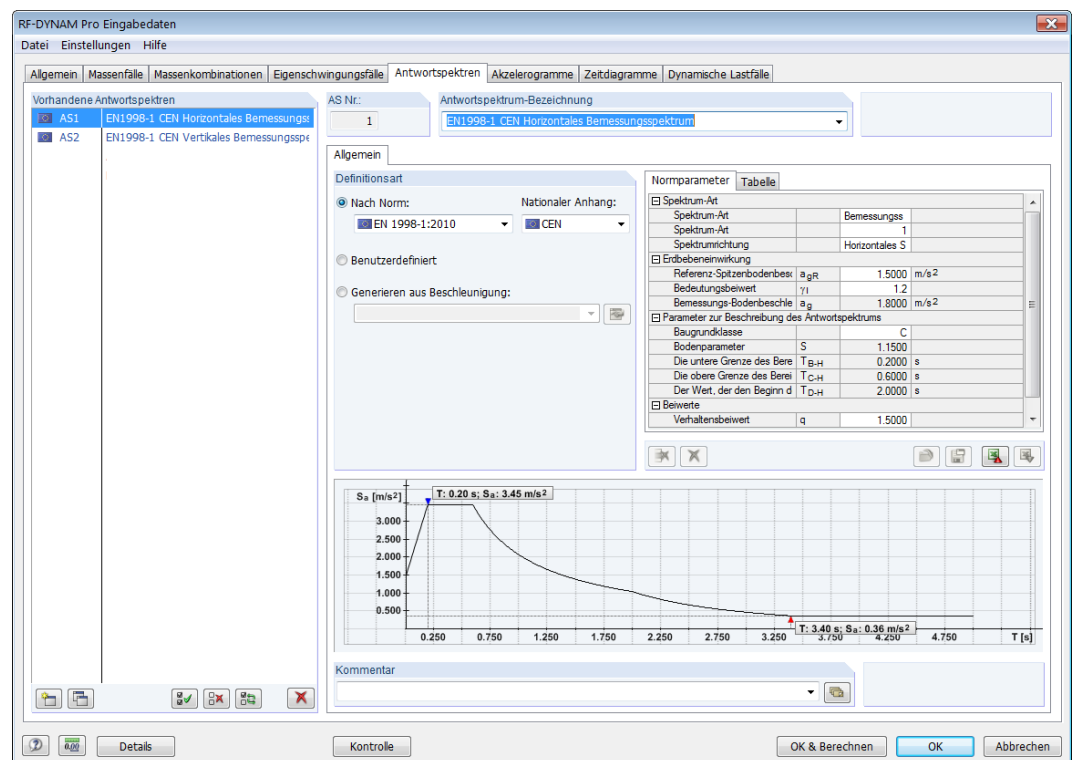
Systemantworten auf ein bestimmtes Eingangssignal (z.B. Mittelwert mehrerer Erdbebenaufzeichnungen) für eine Gruppe von EMS-Schwingern, die jeweils eine andere Eigenfrequenz, aber den gleichen Dämpfungswert haben. Das Antwortspektrenverfahren hat große Vorteile in der Berechnungszeit und ist noch immer eine gängige Methode, die in Baunormen beschrieben wird. Es gilt jedoch zu beachten, dass es nur ein Näherungsverfahren ist, das die maximalen Schnittkräfte der Struktur berechnet. Für weitere Informationen zum Antwortspektrenverfahren siehe zum Beispiel Wilson [8] und Tedesco [9].

Mit *RF-DYNAM Pro* kann das Multimodale und das Multipunkt Antwortspektrenverfahren (nur mit *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*) durchgeführt werden. Einsatzbereite Antwortspektren sind in Baunormen verfügbar, viele davon stehen auch in *RF-DYNAM Pro* zur Verfügung. In *RF-DYNAM Pro* kann auch ein Antwortspektrum aus einem bestehenden Akzelerogramm erzeugt werden (nur in Verbindung mit *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* verfügbar).



Das Register *Antwortspektren* ist nur verfügbar, wenn die *Antwortspektren* oder die *Ersatzlasten* im Register *Allgemein*, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, ausgewählt sind. Dieses Register gehört entweder zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* oder zum Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*.

Das Register *Antwortspektren* ist in [Bild 2.8](#) dargestellt.

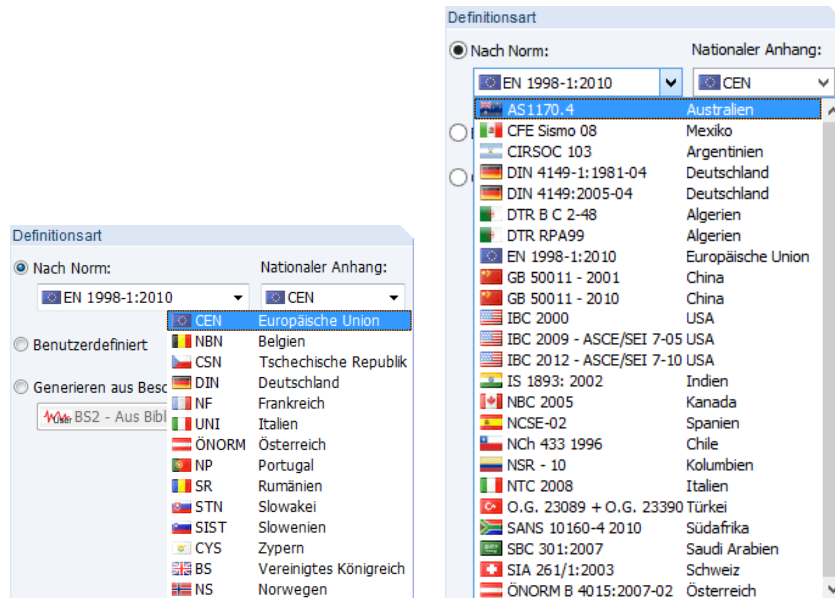


**Bild 2.8:** Maske *Antwortspektren* mit geöffnetem Register *Allgemein*. Antwortspektren *Nach Norm* ist ausgewählt, die *Normparameter* werden angezeigt.

In *RF-DYNAM Pro* gibt es drei Möglichkeiten Antwortspektren einzugeben: Nach Norm, benutzerdefiniert oder generiert aus Beschleunigung.

## Antwortspektren nach Norm

Die Parameter in Übereinstimmung mit einer Baunorm können eingegeben werden, um ein Antwortspektrum zu erzeugen. Die Liste mit den verfügbaren Baunormen ist in den [Bildern 2.9a](#) und [2.9b](#) dargestellt.



a) Nationale Anhänge der EN 1998-1 [1]. b) Internationale Baunormen.

Bild 2.9: Liste der implementierten internationalen Baunormen, die die Erdbebenbemessung von Strukturen festlegen und Formeln für Antwortspektren enthalten.

Es wird eine Norm aus der Liste gewählt; die *Normparameter* und deren Standardwerte (siehe Bild 2.8) ändern sich je nach gewählter Norm. Die Parameter werden aus Drop-Down-Listen ausgewählt oder können je nach Parametertyp und je nach gewählter Baunorm händisch eingegeben werden. Die Felder, die nicht veränderbar sind, sind durch bereits festgelegte Parameter bestimmt. Zum Beispiel legen in der **EN 1998-1 CEN** [1] die Bodenklassen *A* bis *E* die Parameter  $T_B$ ,  $T_C$  und  $T_D$  fest; diese Parameter können nicht händisch verändert werden.



Wenn die Baugrundklasse auf *Andere* gestellt wird, können die Parameter  $T_B$ ,  $T_C$  und  $T_D$  manuell angepasst werden.

Das daraus resultierende Antwortspektrum ist in der Grafik in Bild 2.8 dargestellt. Mit dem Mauszeiger lassen sich Informationen zu den dargestellten Werten anzeigen. Die Werte der erzeugten Antwortspektren sind im Register *Tabelle* aufgeführt, wie in Bild 2.10 dargestellt.

Normparameter		Tabelle	
Nr.	Periode $T$ [s]	Beschleunigung $S_a$ [m/s <sup>2</sup> ]	
1	0.000	1.380	
2	0.050	1.897	
3	0.100	2.415	
4	0.150	2.933	
5	0.200	3.450	
6	0.250	3.450	
7	0.300	3.450	
8	0.350	3.450	
9	0.400	3.450	
10	0.450	3.450	
11	0.500	3.450	
12	0.550	3.450	
13	0.600	3.450	
14	0.650	3.185	

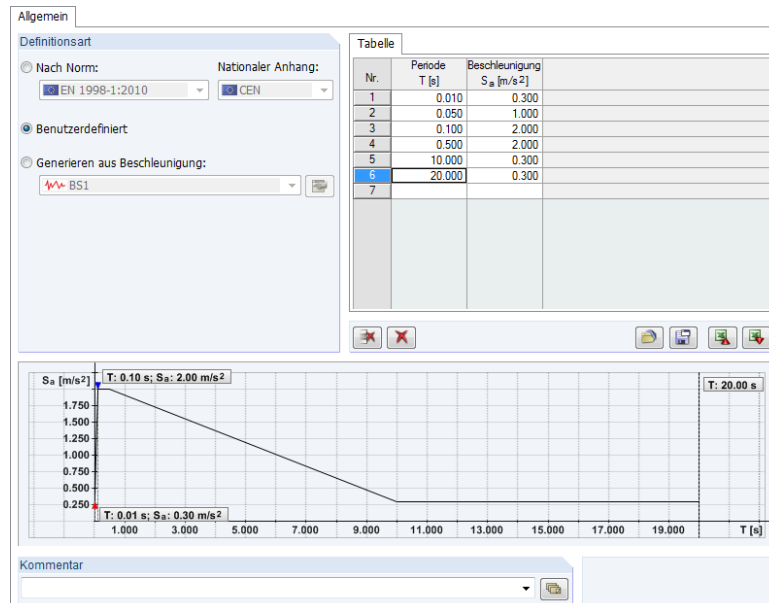
Bild 2.10: Werte in Tabellenform des erzeugten Antwortspektrums.



Diese Werte in Tabellenform können in *Excel* exportiert werden. Der Zeitschritt muss angepasst werden, bevor die Daten exportiert werden.

## Benutzerdefinierte Antwortspektren

Jedes beliebige Antwortspektrum kann definiert werden, indem die Periode  $T$  und dazugehörige Beschleunigungen  $S_a [m/s^2]$  in der Tabelle wie in **Bild 2.11** dargestellt eingegeben werden.



**Bild 2.11:** Benutzerdefinierte Eingabe eines Antwortspektrums. Periode  $T$  und Beschleunigung  $S_a [m/s^2]$  müssen angegeben werden.



Benutzerdefinierte Antwortspektren können in einer Bibliothek gespeichert werden und sind jederzeit verfügbar. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um den Dateinamen einzugeben.



Die benutzerdefinierten Antwortspektren können in *Excel* exportiert oder ein Antwortspektrum kann aus *Excel* importieren werden.

## Aus Akzelerogrammen erzeugte Antwortspektren

Die Antwortspektren können automatisch aus einem bestehenden Akzelerogramm erzeugt werden.



Diese Option ist nur verfügbar, wenn *Beschleunigungen* im Register *Allgemein* ausgewählt sind, wie in **Bild 2.1** dargestellt. Diese Option gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*.

Die vorhandenen Optionen, um Antwortspektren aus einer bestehenden Beschleunigung zu erzeugen, sind in **Bild 2.12** dargestellt.



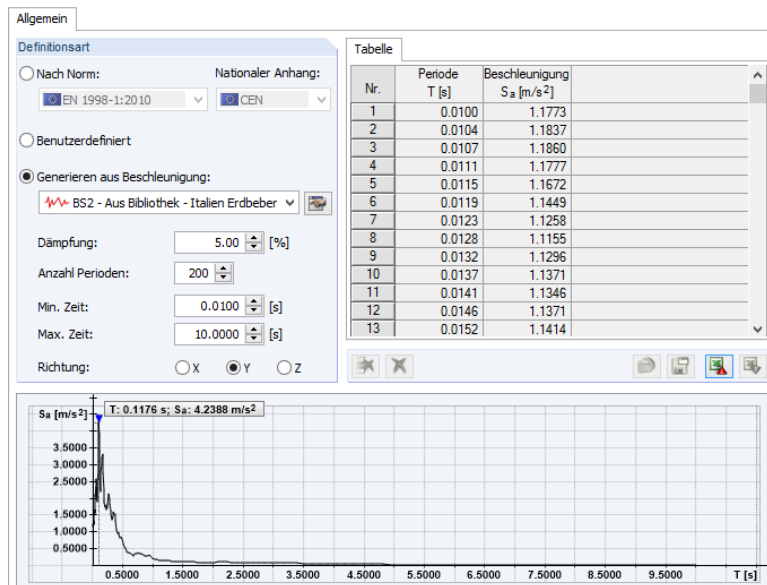
Die Schaltfläche [Bearbeiten] öffnet das Register *Akzelerogramme* wie in **Abschnitt 2.6** beschrieben, in dem Beschleunigungs-Zeit-Digramme benutzerdefiniert festgelegt oder Akzelerogramme aus einer umfangreichen Bibliothek mit Erdbebenaufzeichnungen geladen werden können. Wenn Akzelerogramme bereits definiert wurden, kann aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt werden.

Dämpfung: 5.00 [%]  
Anzahl Perioden: 200  
Min. Zeit: 0.010 [s]  
Max. Zeit: 10.000 [s]

Sie können die links dargestellten Parameter anpassen. Das erzeugte Antwortspektrum ist in der Grafik unten dargestellt und die Werte der Periode  $T$  und der Beschleunigung  $S_a$  sind in der Tabelle aufgeführt (siehe **Bild 2.12**). Beides wird aktualisiert, sobald einer der Parameter geändert wird.

Die viskose Dämpfung  $d$  [%] ist die Dämpfung der EMS-Gruppe, für die die maximalen Systemreaktionen berechnet werden. Die erzeugten Beschleunigungen sind umso kleiner je höher die viskose Dämpfung gesetzt ist.





**Bild 2.12:** Erzeugtes Antwortspektrum aus einer bestehenden Beschleunigung. Das Antwortspektrum wird in der Grafik angezeigt und die Werte sind in der Tabelle angeführt.

Die Anzahl der Perioden bestimmt die Anzahl an Schritten zwischen der minimalen und der maximalen Zeit (Periode) und bestimmt damit die Anzahl an erzeugten Datenpunkten.

Die minimale Zeit ist die Periode des ersten EMS, der für die Berechnung berücksichtigt wird. Die Ergebnisse werden in der ersten Spalte der Tabelle, wie in Bild 2.12 dargestellt, angezeigt.

Die maximale Zeit ist die Periode des letzten EMS-Schwingers, der für die Berechnung berücksichtigt wird. Die Ergebnisse werden in der letzten Spalte der Tabelle, wie in Bild 2.12 dargestellt, angezeigt.

Richtung: ☐ X ☒ Y ☐ Z

Die erzeugten Antwortspektren können in jede Richtung unterschiedlich sein, da die Akzelerogramme in jede Richtung verschieden sein können. Die dargestellten Antwortspektren können in der Grafik und in der Tabelle geändert werden, indem die auf der linken Seite gezeigten Optionsschaltflächen verwendet werden.



Die erzeugten Antwortspektren können in Excel exportiert werden

## 2.6 Akzelerogramme

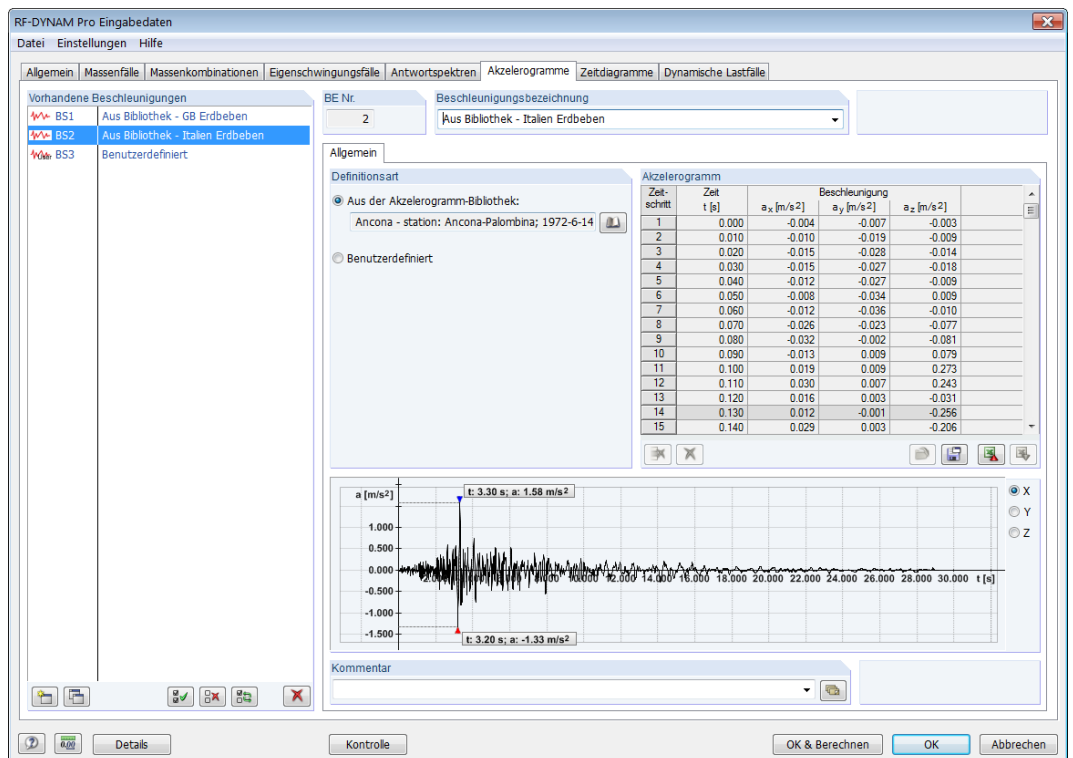
Akzelerogramme sind Beschleunigungs-Zeit-Diagramme, die üblicherweise bei früheren Erdbeben aufgezeichnet wurden. In RF-DYNAM Pro können Akzelerogramme verwendet werden, um Antwortspektren zu erzeugen oder ein Zeitverlaufsverfahren durchzuführen. In beiden Fällen kann die Struktur an allen oder nur an einigen Lagern angeregt werden.

Das Register *Akzelerogramme* ist in Bild 2.13 dargestellt.



Das Register *Akzelerogramme* ist nur verfügbar, wenn *Beschleunigungen* im Register *Allgemein*, wie in Bild 2.1 dargestellt, ausgewählt sind. Dieses Register gehört zum Zusatzmodul RF-DYNAM Pro - *Erzwungene Schwingungen*.

In RF-DYNAM Pro können Akzelerogramme aus einer Bibliothek geladen oder händisch eingegeben werden.



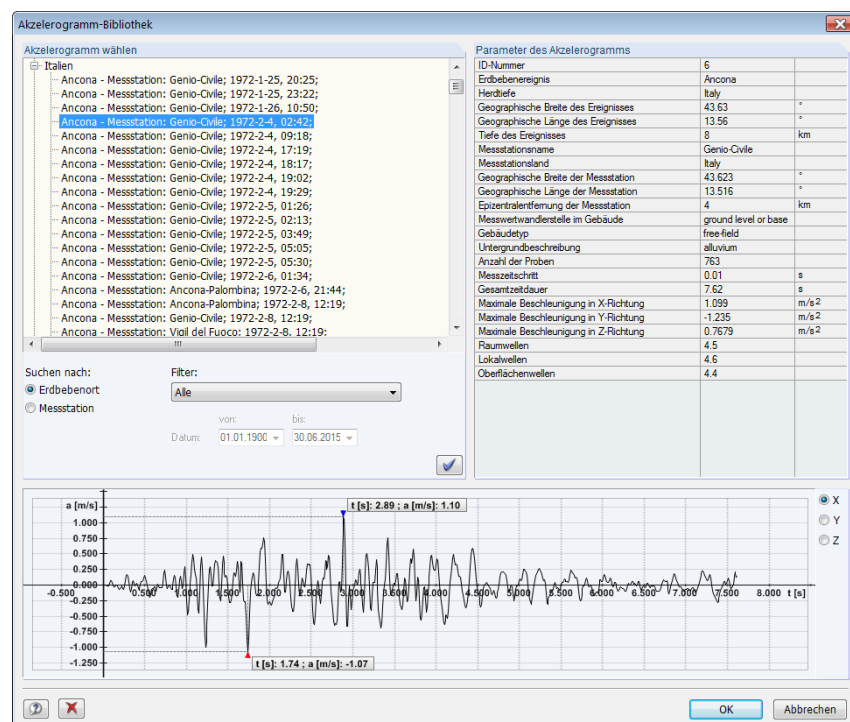
**Bild 2.13:** Maske Akzelerogramme mit geöffnetem Register *Allgemein*.

## Bibliothek mit Erdbebenaufzeichnungen

In *RF-DYNAM Pro* steht eine Bibliothek zur Verfügung, die eine Vielzahl an vorhandenen und gemessenen Akzelerogrammen bietet. Aktuell gibt es mehr als 1018 Akzelerogramme, die in dieser Bibliothek gesammelt und gespeichert sind. Darüber hinaus können benutzerdefinierte Akzelerogramme dieser Bibliothek hinzugefügt werden.



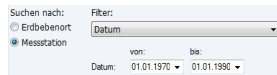
Die Bibliothek kann mit der links dargestellten Schaltfläche aufgerufen werden. Die Bibliothek ist in **Bild 2.14** dargestellt.



**Bild 2.14:** Bibliothek mit einer Vielzahl an Erdbebenaufzeichnungen.



Die Akzelerogramme werden links in einer Baumstruktur dargestellt und können dort ausgewählt werden.



Es besteht die Möglichkeit, Einträge nach *Messstation* oder *Erdbebenort* zu ordnen. Mehr Filterkriterien können aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt werden. Zum Beispiel ist es möglich, die Akzelerogramme auf eine bestimmte Zeitspanne zu begrenzen.

Jedes Akzelerogramm verfügt über Parameter. Es sind zum Beispiel das Land, Längen- und Breitengrade sowie die Entfernung zum Epizentrum ersichtlich. Diese Daten werden auf der rechten Seite der Bibliothek, wie in [Bild 2.14](#) dargestellt, angezeigt.



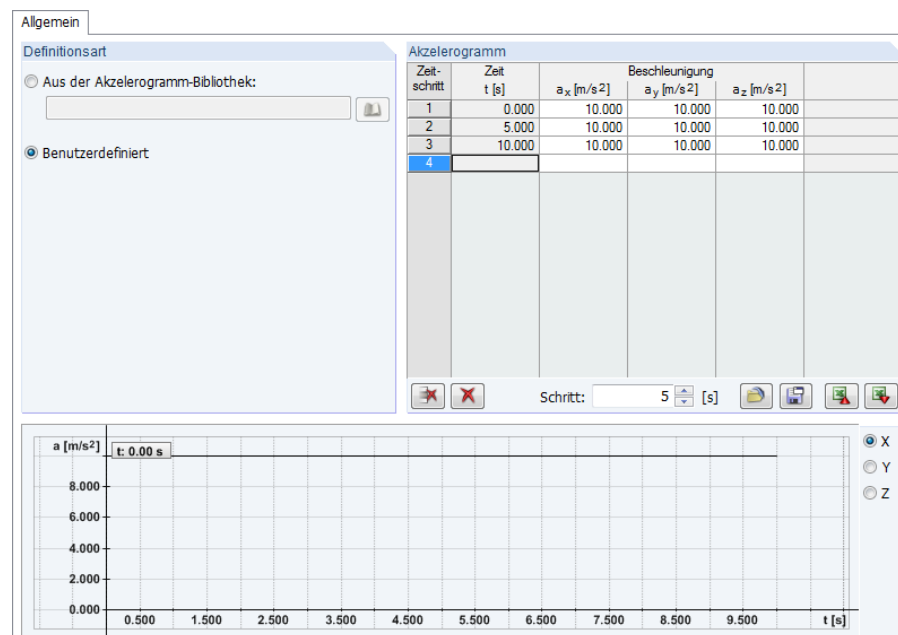
Das gewählte Akzelerogramm wird in der Grafik am Ende der Maske, wie in [Bild 2.13](#) dargestellt, angezeigt. Die meisten Akzelerogramme unterscheiden sich in den drei Richtungen *X*, *Y* und *Z*. In der Grafik kann zwischen diesen Richtungen hin- und hergewechselt werden.



Akzelerogramme, die aus der Bibliothek geladen werden, können unter einem anderen Dateinamen abgespeichert werden. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um den Dateinamen einzugeben. Alternativ können diese Akzelerogramme in Excel exportiert werden.

## Benutzerdefinierte Beschleunigungs-Zeit-Diagramme

Jede Art von Beschleunigungs-Zeit-Diagramm kann festgelegt werden, indem die benötigten Werte in der Tabelle, dargestellt in [Bild 2.15](#), eingetragen werden.



**Bild 2.15:** Benutzerdefinierte Eingabe eines Beschleunigungs-Zeit-Diagramms.



Benutzerdefinierte Akzelerogramme können in einer Bibliothek gespeichert werden und sind jederzeit verfügbar. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um den Dateinamen einzugeben.



Die benutzerdefinierten Akzelerogramme können in *Excel* exportiert werden oder ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm kann aus *Excel* importiert werden.



Das definierte Akzelerogramm wird in der Grafik angezeigt (siehe [Bild 2.13](#)). In der Grafik kann zwischen der *X*, *Y* und *Z*-Richtung hin- und hergewechselt werden.

## 2.7 Zeitdiagramme

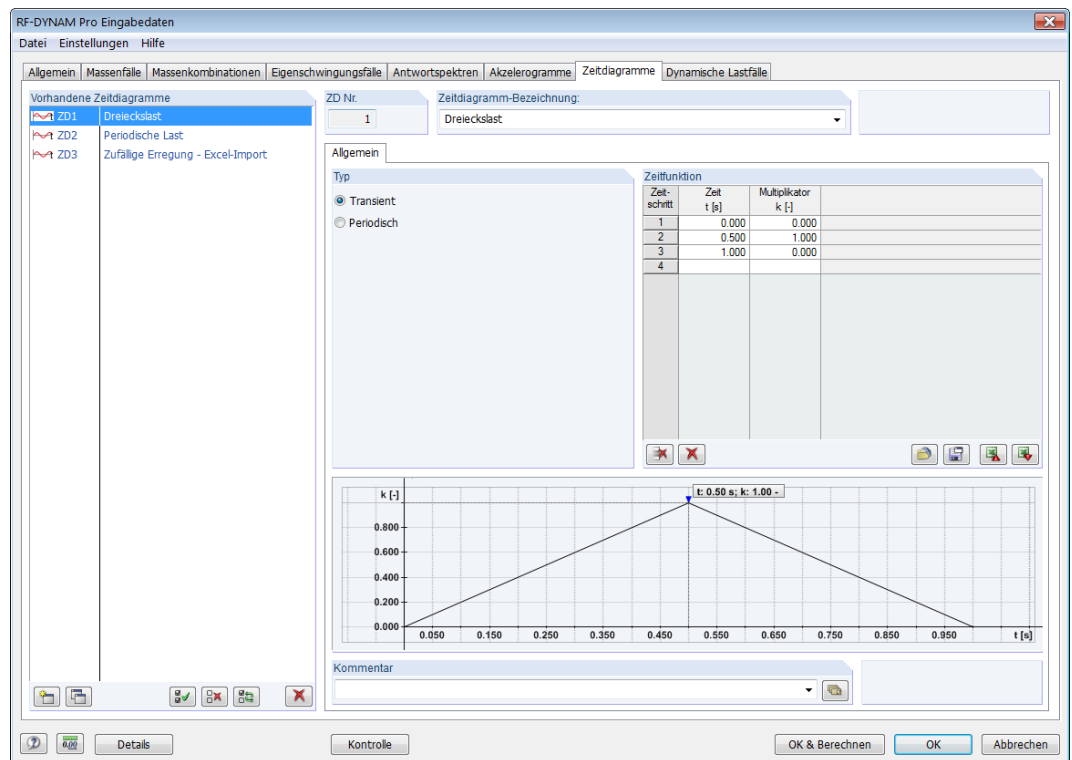
Zeitdiagramme können entweder als transient oder periodisch definiert werden, oder direkt als Funktion eingegeben werden. Sie erregen die Struktur an einer bestimmten Position. Die Position der Last wird in statischen Lastfällen (LFs) festgelegt, hier kann nahezu jeder Lasttyp eingegeben werden. Die statischen Lastfälle (LFs) werden mit den Zeitdiagrammen (ZDs) verknüpft, dies geschieht in den *Dynamischen Lastfällen* (siehe [Abschnitt 2.8](#)). Der Multiplikator  $k$  wird verwendet, um die endgültige Größe der Erregerkraft zu bestimmen.



Das Register Zeitdiagramme ist nur verfügbar, wenn *Zeitdiagramme* im Register *Allgemein*, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, ausgewählt sind. Dieses Register gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*.

### Transiente Zeitdiagramme

Das Register *Zeitdiagramme* ist in [Bild 2.16](#) mit einem Beispiel eines transienten Zeitdiagramms dargestellt. Die Werte werden in die Tabelle eingegeben und das daraus resultierende Zeitdiagramm wird in der Grafik am unteren Ende dargestellt.



**Bild 2.16:** Maske *Zeitdiagramme* mit Anzeige der Eingabe von transienten Zeitdiagrammen.



Die Tabelleneinträge können in einer Bibliothek gespeichert und jederzeit aufgerufen werden, ein Import und Export aus und in *Excel* ist möglich.

### Periodische Erregung

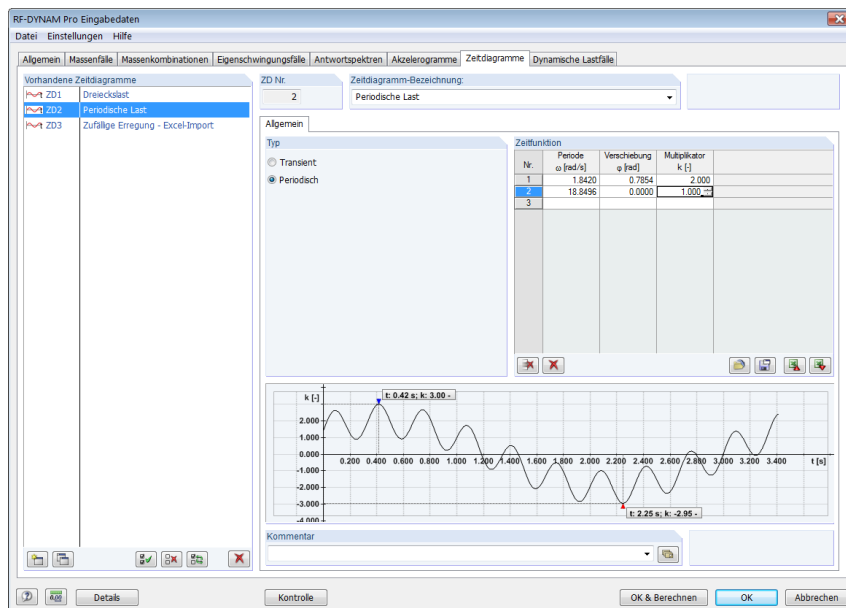
Um periodische Funktionen einzugeben, müssen die Kreisfrequenz  $\omega$  [rad/s], die Verschiebung  $\varphi$  [rad] und der Multiplikator  $k$  in Tabellenform vorliegen; dies ist in [Bild 2.17](#) dargestellt.

Mehrere harmonische Funktionen können überlagert werden, indem mehrere Reihen in der Tabelle ausgefüllt werden. Die periodischen Funktionen sind folgendermaßen definiert:

$$f(t) = k_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) + k_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi_2) + \dots \quad (2.6)$$



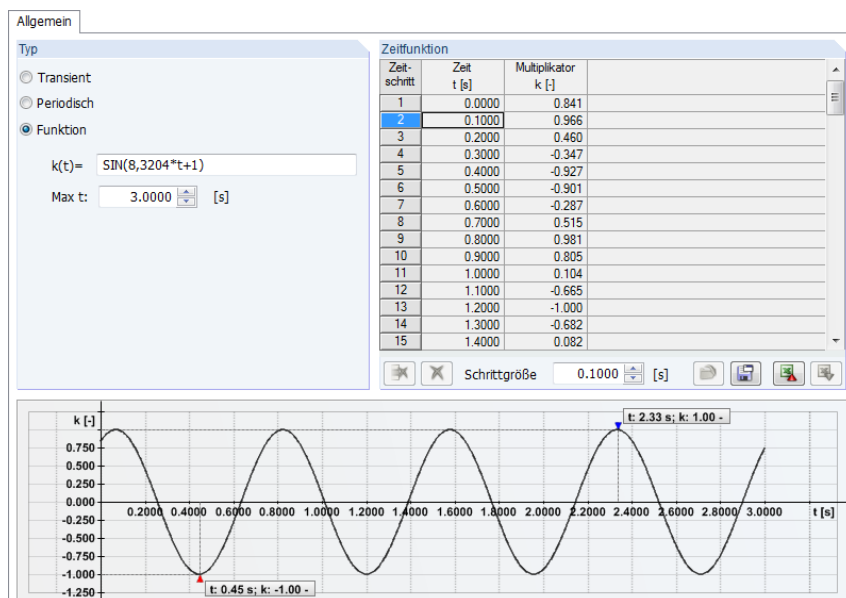
Die bekannten Schaltflächen Öffnen, Speichern, Import und Export sind verfügbar.



**Bild 2.17:** Maske *Zeitdiagramme* mit Anzeige der Eingabe von periodischen Zeitdiagrammen.

## Funktionen

Eine Funktion  $k(t)$  kann direkt in einem Eingabefeld eingegeben werden, um das Zeitdiagramm zu definieren. Der Parameter  $t$  ist der Zeit vorbehalten. Das daraus resultierende Zeitdiagramm ist in der Grafik in [Bild 2.18](#) dargestellt. Die erzeugten Werte in Tabellenform werden auf der rechten Seite angezeigt.



**Bild 2.18:** Maske *Zeitdiagramme* mit Anzeige der Eingabe von Funktionen als Zeitdiagramme. Der Parameter  $t$  ist der Zeit vorbehalten.

Die maximale Zeit  $t_{max}$  kann angepasst werden, was Auswirkungen auf die Grafik und die Werte in der Tabelle hat.



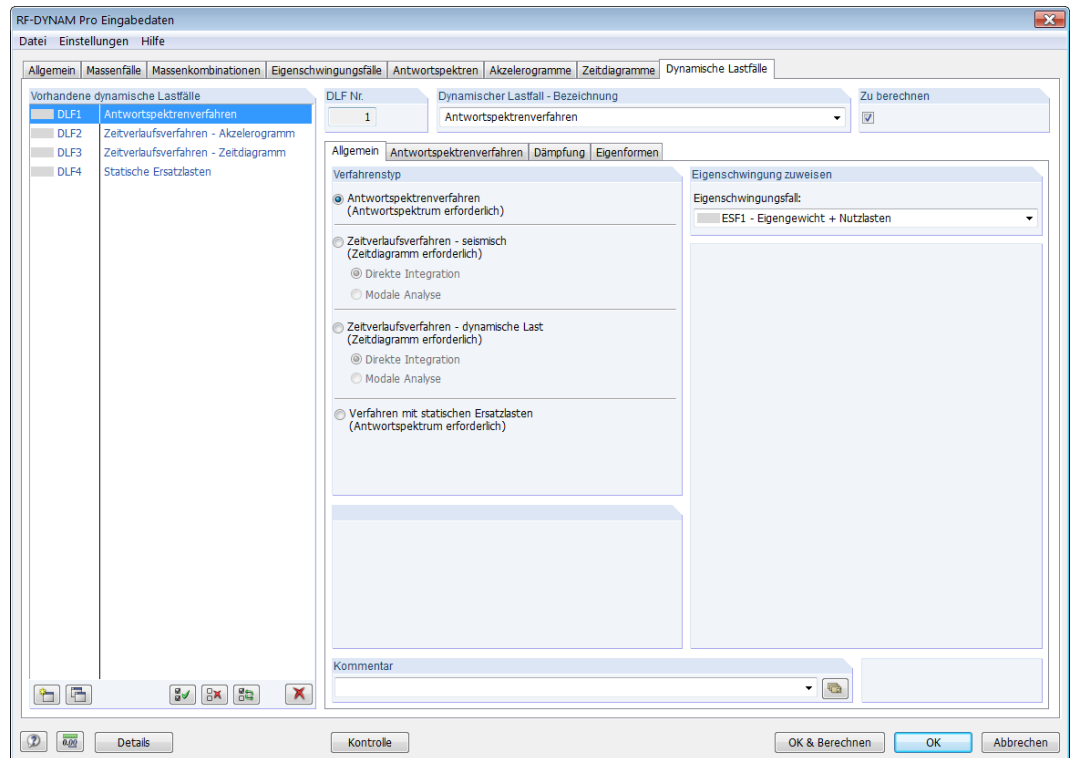
Alle Operatoren und Funktionen, die in RFEM verfügbar sind, können auch in *RF-DYNAM Pro* verwendet werden. Es können die Parameter verwendet werden, die im Hauptprogramm RFEM festgelegt wurden. Weitere Informationen zur parametrisierbaren Eingabe stehen im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 11.6**.



Die Werte in Tabellenform können in der Bibliothek gespeichert oder in *Excel* exportiert werden. Die Zeitschritte müssen angepasst werden, bevor die Daten exportiert werden.

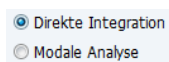
## 2.8 Dynamische Lastfälle

Die *Dynamischen Lastfälle* kombinieren die bisher getätigte Eingabe und legen Berechnungsparameter fest. Vier verschiedene Arten von *Dynamischen Lastfällen* sind verfügbar: Antwortspektrenverfahren, Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen, Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen und das Verfahren mit statischen Ersatzlasten. Die ersten drei Arten sind Teil des Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* und die letzte Option gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*. Das Register *Allgemein* des Registers *Dynamische Lastfälle* ist in [Bild 2.19](#) dargestellt.



**Bild 2.19:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Allgemein*.

Die Optionen sind nur verfügbar, wenn die benötigten Daten (wie in Klammern angegeben) eingegeben werden. Wenn manche Eingabedaten fehlen, sind die Optionen im Register *Allgemein* ([Bild 2.19](#)) grau dargestellt.

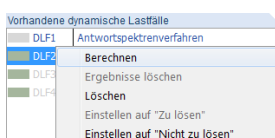


Es kann zwischen der *Direkten Integration* und der *Modalen Analyse* gewählt werden, wenn ein Zeitverlaufsverfahren durchgeführt wird. Weitere Informationen zu diesen Lösungsmethoden gibt es in den [Abschnitten 2.8.2](#) und [2.8.3](#).



Ein bestimmter *Eigenschwingungsfall* (in [Abschnitt 2.4](#) erläutert) muss dem Dynamischen Lastfall (DLC) zugeordnet werden.

Die Dynamische Lastfallnummer wird automatisch erzeugt und kann nicht verändert werden. Falls ein Fall später gelöscht wird, ändert sich die Nummerierung nicht. Es kann festgelegt werden, ob der spezifische *Dynamische Lastfall* durch Auswählen oder Aufheben des Kontrollfeldes *Zu berechnen* berechnet wird oder nicht. Diese Möglichkeit kann auch im Kontextmenü aufgerufen werden (Rechtsklick auf die bestehenden *DLFs*).



Es kann jeder *Dynamische Lastfall* einzeln berechnet werden, indem das Kontextmenü verwendet und *Berechnen* ausgewählt wird. Die Farbe eines *DLF* wird grau dargestellt, wenn keine Ergebnisse dieses *DLF* verfügbar sind und verändert sich zu grün, sobald die Berechnung abgeschlossen ist und Ergebnisse verfügbar sind, weitere Information finden Sie im [Abschnitt 3.3](#).

Lastfälle (LCs) und / oder Ergebniskombinationen (EKs) werden in jedem der *Dynamischen Lastfälle* generiert, wenn die Kontrollfelder im Abschnitt *Zu generieren* ausgewählt sind (im Register *Antwortspektrenverfahren* in Bild 2.20, im Register *Zeitverlaufsverfahren* in Bild 2.23 und 2.26 und im Register *Verfahren mit äquivalenten Kräften* in Bild 2.27). Diese LFs und EKs werden automatisch generiert und überschrieben, wenn die Berechnung in *RF-DYNAM Pro* erneut durchgeführt wird. Die Bezeichnungen der LFs und EKs beziehen sich eindeutig auf die ursprünglichen DLFs. Wahlweise kann die Nummer des ersten erzeugten LF / der ersten erzeugten LK händisch eingegeben werden. In *RF-DYNAM Pro* werden keine bestehenden LFs oder EKs (statische oder aus anderen Modulen erzeugte) überschrieben, es wird die erste verfügbare, noch nicht verwendete LF- / EK-Nummer ausgewählt. Lastfälle und Ergebniskombinationen aus *RF-DYNAM Pro* werden gelöscht, wenn die Ergebnisse aus den entsprechenden *Dynamischen Lastfällen* gelöscht werden.

## 2.8.1 Antwortspektrenverfahren

Ein Antwortspektrenverfahren wird durchgeführt, wenn die entsprechende Optionsschaltfläche in Bild 2.19 ausgewählt ist; diese Option ist nur in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* verfügbar.

Die entsprechenden Unterregister, wenn ein Antwortspektrenverfahren durchgeführt wird, sind *Allgemein*, *Antwortspektrenverfahren*, *Dämpfung* und *Eigenformen*. Das Register *Antwortspektrenverfahren* ist in Bild 2.20 dargestellt.

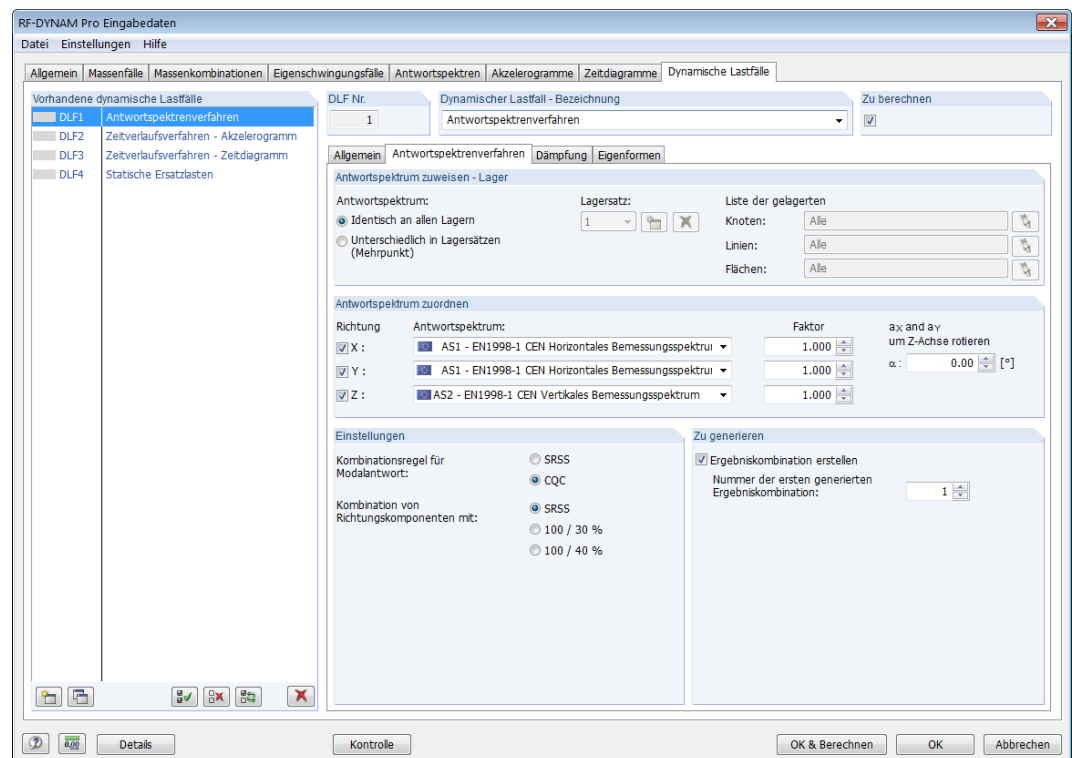


Bild 2.20: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Antwortspektrenverfahren*.

### Lager zuweisen

Die Lager, die durch das Antwortspektrum in Erregung versetzt werden, müssen zugewiesen werden. Wenn alle Lager identisch angeregt werden, können diese Lager Knoten-, Linien- oder Flächenlager sein. Die Multipunkt-Option ist im Moment nur für Knotenlager verfügbar.

Über die Schaltfläche [Neu] können mehrere Lagersätze angelegt werden. Es ist möglich, zwischen den vorhandenen Sätzen unter Verwendung des Drop-Down-Menüs hin- und herzuwechseln. Um einen bestimmten Satz zu löschen, wird die Schaltfläche [Löschen] verwendet. Für jeden Satz

- ☒ Identisch an allen Lagern
- ☐ Unterschiedlich in Lagersätzen (Mehrpunkt)

Lagersatz:

1

muss eine Liste an gelagerten Knoten vorhanden sein. Es ist eine händische Eingabe möglich oder die Auswahl kann in der Grafik über die Schaltfläche erfolgen.

### Antwortspektrum zuweisen

In jede Richtung kann ein unterschiedliches Antwortspektrum zugewiesen werden. Es muss zumindest eine der Richtungen ausgewählt sein. Die vorhandenen Antwortspektren werden aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt. Der Multiplikationsfaktor kann für jede Richtung frei gewählt werden.

ax and ay  
um Z-Achse rotieren  
 $\alpha$ :  [°]

Die Erregungsrichtung kann in der  $X$ - $Y$ -Ebene um die  $Z$ -Achse rotieren. Wenn die Antwortspektren beispielsweise die Struktur um  $45^\circ$  rotierend um die  $Z$ -Achse erregen sollen, wird nur die  $X$ -Richtung aktiviert und  $\alpha = 45^\circ$  eingegeben.



Für jeden Lagersatz müssen die Antwortspektren in jede bestimmte Richtung einzeln aktiviert werden. Damit sind verschiedene Antwortspektren an jedem Lagersatz möglich.

### Kombinationsregeln

In den Einstellungen wird festgelegt, wie die Antworten, die aus verschiedenen Formen der Struktur und aus verschiedenen Erregungsrichtungen stammen, kombiniert werden.

☒ SRSS  
☐ CQC

Die Modalantworten können mit der *Quadratsummenwurzel-Regel (SRSS)* oder der *Vollständigen quadratischen Kombinationsregel (CQC)* kombiniert werden. Die Ergebnisse  $E$  werden mit der SRSS-Regel folgendermaßen kombiniert:

$$E_{SRSS} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_p^2} \quad (2.7)$$

$E_p$  stellt die Mitwirkungen dar, die sich aus  $p$ -Formen der Struktur ergeben.

Die SRSS-Regel ist nur für Strukturen erlaubt, bei denen benachbarte Eigenfrequenzen  $T_i < T_j$  mehr als 10% abweichen, also wenn die folgende Aussage zutreffend ist:

$$\frac{T_i}{T_j} < 0,9 \quad (2.8)$$

In allen anderen Fällen muss die CQC-Regel angewendet werden. Die CQC-Regel ist folgendermaßen definiert:

$$E_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p E_i \varepsilon_{ij} E_j} \quad (2.9)$$

mit dem Korrelations-Koeffizienten  $\varepsilon$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \cdot \sqrt{D_i D_j} (D_i + r D_j) r^{3/2}}{(1 - r^2)^2 + 4 D_i D_j r (1 + r^2) + 4 (D_i^2 + D_j^2) r^2} \quad \text{mit } r = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (2.10)$$

Der Korrelations-Koeffizient  $\varepsilon$  vereinfacht sich, wenn der viskose Dämpfungswert  $D$  für alle Eigenformen gleich gewählt wird:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \cdot D^2 (1 + r) r^{3/2}}{(1 - r^2)^2 + 4 D^2 r (1 + r^2)} \quad (2.11)$$

☒ SRSS  
☐ 100 / 30 %  
☐ 100 / 40 %

Die Schnittgrößen aus verschiedenen Erregungsrichtungen können quadratisch mit der SRSS-Regel kombiniert werden oder mit Hilfe der 100% / 30% (40%)-Regel bekannt aus **EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.5** [1]. Die SRSS-Regel wird wie in [Gleichung 2.7](#) definiert angewendet, aber nun sind  $i = 1..p$  die Erregungsrichtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ .

## Export von Ergebniskombinationen

Wenn *Ergebniskombinationen erstellen* ausgewählt wird, erzeugt *RF-DYNAM Pro* automatisch Ergebniskombinationen und überschreibt diese während der Berechnung. Die *EKs* sind eng mit dem Ergebnis verbunden, d.h., dass sie gelöscht werden, sobald die Ergebnisse der *DLFs* gelöscht werden (siehe [Abschnitt 3.3](#)).



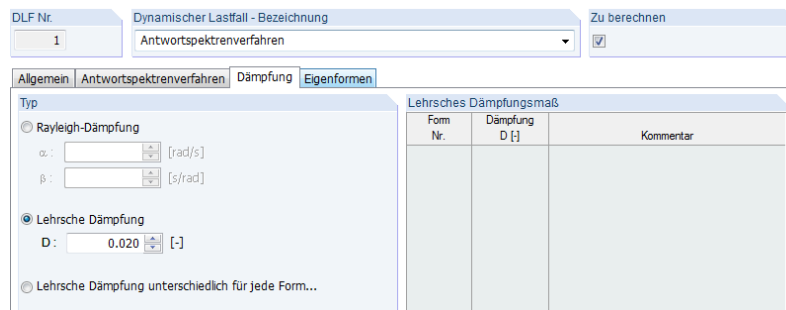
Eine *EK* wird für die *SRSS*-Regel erzeugt, und maximal drei *EKs* werden erzeugt, wenn die 100% / 30% (40%)-Regel ausgewählt wird.

## Dämpfung für die CQC - Regel



Das Register *Dämpfung* ist nur verfügbar, wenn die *CQC*-Regel für die Kombination von Eigenformen (in [Gleichung 2.10](#) festgelegt) ausgewählt ist.

Für die *CQC*-Regel werden die Lehrschen Dämpfungswerte  $D_i$  benötigt, die gleich oder unterschiedlich für jede Form der Struktur definiert sein können. Auch die Rayleigh-Dämpfung mit den Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  steht zur Verfügung und wird intern zur Lehrschen Dämpfung konvertiert. Das Register *Dämpfung* ist in [Bild 2.21](#) dargestellt.



Form Nr.	Dämpfung D [-]	Kommentar

**Bild 2.21:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Dämpfung*.



Die viskose Strukturdämpfung ist für das Zeitverlaufsverfahren eher von Bedeutung und wird daher in [Abschnitt 2.8.2](#) näher beschrieben.

## Wahl der Eigenform

Im Register *Eigenformen*, dargestellt in [Bild 2.22](#), sind die Eigenfrequenzen  $\omega$  und  $f$  sowie die Perioden  $T$  zusammen mit den entsprechenden Beschleunigungen  $S_a$  des Antwortspektrums und den effektiven Modalmassenfaktoren  $f_{me}$  in die einzelnen Richtungen aufgelistet. Das zugewiesene Antwortspektrum ist in der Grafik dargestellt. Die entsprechenden Werte werden in Rot dargestellt, wenn eine Zeile in der Tabelle ausgewählt wird.

Eigenformen berechnen

Wenn noch keine Berechnung durchgeführt wurde, kann die Schaltfläche [Eigenformen berechnen] verwendet werden um intern die Frequenzen zu berechnen, ohne das Modul zu schließen.

In der Tabelle können Formen ausgewählt werden, die für das Antwortspektrenverfahren verwendet werden sollen.

☒ Alle selektieren

Alle Formen werden ausgewählt, wenn das Kontrollfeld *Alle selektieren* aktiviert ist. In der Tabelle sind alle Formen ausgewählt. Eine manuelle Änderung ist nicht möglich.

☒ Auswahl der Formen aufheben mit  
 $M_{eff, i} / \Sigma M < 0.050$

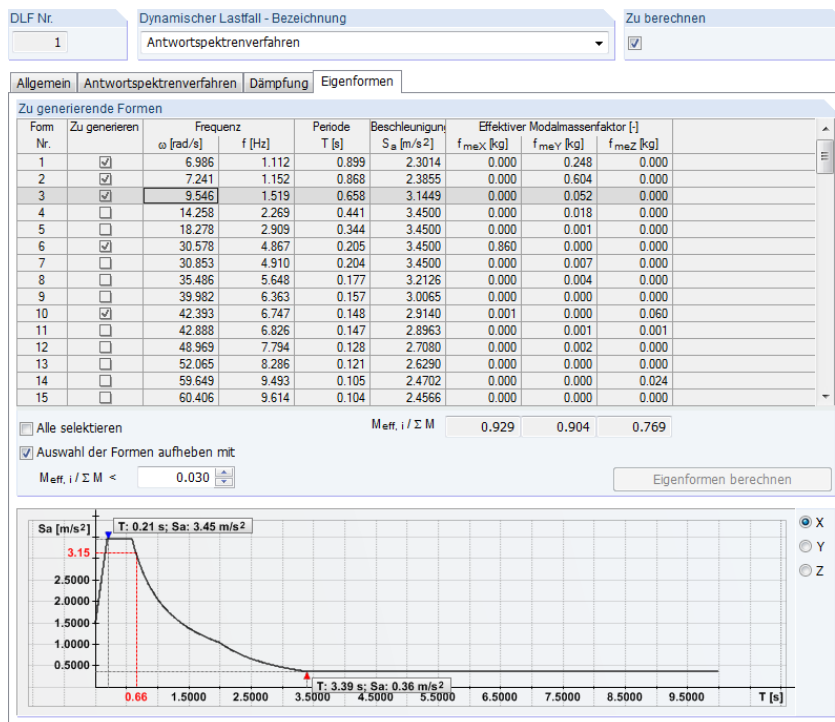
Mit dem Kontrollfeld *Auswahl der Formen aufheben mit* ist es möglich, die Formen mit einem effektiven Modalmassenfaktor unter einem gewissen Wert zu deaktivieren. Diese Auswahl wird gespeichert, wenn das Kontrollfeld deaktiviert wird.

Wenn beide Kontrollfelder deaktiviert sind, können individuelle Formen händisch ausgewählt werden.



Die Summe der effektiven Modalmassenfaktoren  $f_{me}$  wird unten in der Tabelle angezeigt. In Übereinstimmung mit **EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.3 [1]** müssen die effektiven Modalmassenfaktoren





**Bild 2.22:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Eigenformen*. Die dritte Form ist in der Tabelle ausgewählt und in der Grafik rot dargestellt.

aller Formen die berücksichtigt werden, mindestens 90% betragen. Wenn das nicht erreicht werden kann, sind alle Formen mit einem Faktor über 5% zu berücksichtigen. Weitere Informationen zu den effektiven Modalmassenfaktoren werden in [Abschnitt 4.1](#) gegeben.



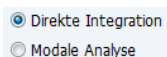
Zwischen den Erregungsrichtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  kann in der Grafik hin- und hergewechselt werden. Es gilt zu berücksichtigen, dass auch die Werte  $S_a$  aufgrund dieser Auswahl aktualisiert werden.

### 2.8.2 Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen

Ein Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen wird durchgeführt, wenn die entsprechende Optionsschaltfläche in [Bild 2.19](#) ausgewählt ist; diese Option ist nur in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* verfügbar.

Die entsprechenden Unterregister, wenn ein Zeitverlaufsverfahren durchgeführt wird, sind *Allgemein*, *Zeitverlaufsverfahren* und *Dämpfung*. Das Register *Zeitverlaufsverfahren* ist in [Bild 2.23](#) dargestellt.

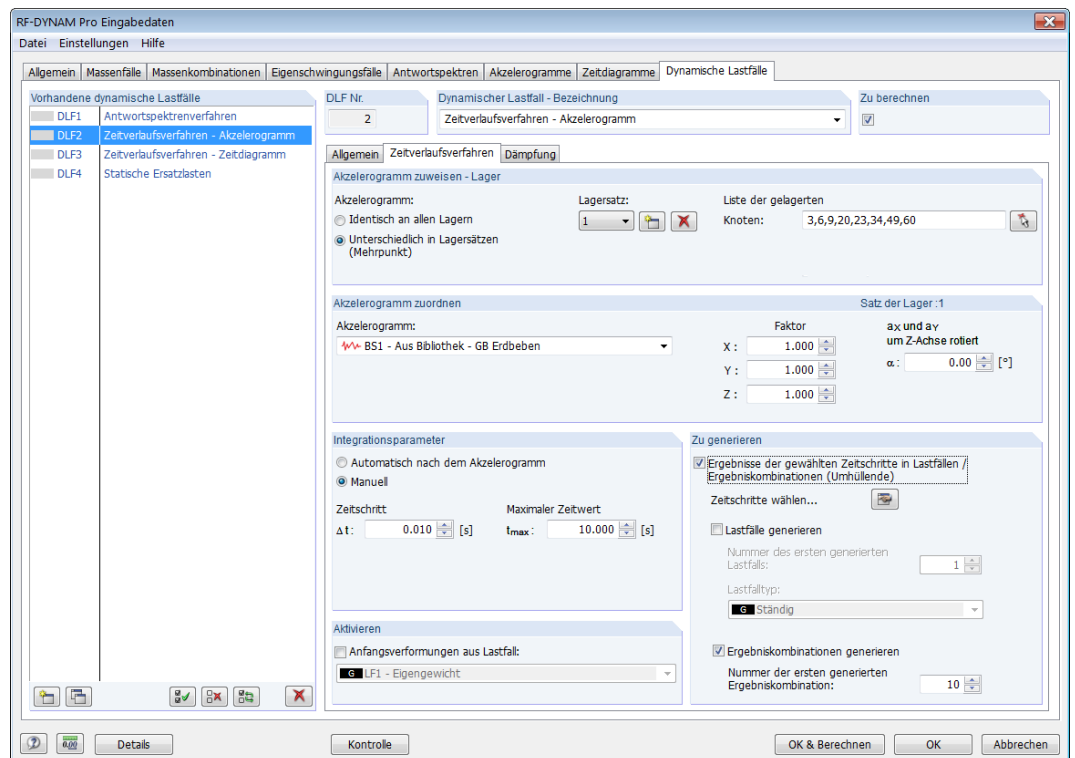
#### Modalanalyse im Vergleich zur Direkten Integration



Im Register *Allgemein* (siehe [Bild 2.19](#)) kann zwischen der Modalanalyse und der direkten Integration gewählt werden.

Die Modalanalyse verwendet ein entkoppeltes System, das auf den Eigenwerten und Eigenformen der Struktur basiert und im zugewiesenen *Eigenschwingungsfall* bestimmt wird. Das Mehrfreiheitsgradsystem (MDOF) wird in viele Einfreiheitsgradsysteme (SDOF) zerlegt (diagonalisierte Massen- und Steifigkeitsmatrix). Eine gewisse Anzahl an Eigenwerten wird benötigt, um Genauigkeit zu gewährleisten. Die Lösung des entkoppelten Systems wird mit einem impliziten (*Newmark*) Solver gefunden. Sobald die Eigenwerte bestimmt sind, ist die Modalanalyse, die in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* zur Verfügung steht, etwas schneller als die direkte Integration.





**Bild 2.23:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Zeitverlaufsverfahren (Akzelerogramme)*.

Die direkte Integration verwendet den impliziten (*Newmark*) Solver, der ausreichend kleine Zeitschritte benötigt, um genaue Ergebnisse zu erzielen. Bis jetzt, kann dieser Solver nur lineare Systeme in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* berechnen. Es ist keine Modalanalyse erforderlich, daher kann die Anzahl der erforderlichen Eigenwerte auf 1 gesetzt werden (im zugewiesenen *Eigenschwingungsfall*, siehe [Abschnitt 2.4](#)).

Am wichtigsten bei der Durchführung eines Zeitverlaufsverfahrens ist die Wahl des Zeitschrittes. Es ist ein Kompromiss zwischen Berechnungszeit und Genauigkeit. Je kleiner der Zeitschritt gewählt wird, desto länger dauert die Berechnung, aber wenn der Zeitschritt zu groß gewählt wird, führt dies zu ungenauen Ergebnissen. Folgender Ratschlag kann gegeben werden [10]:

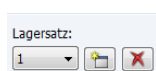
- Die kürzeste Länge des verwendeten Zeitdiagramms (siehe [Abschnitt 2.7](#)) sollte mindestens in 7 Zeitschritte unterteilt werden.
- Die größte Frequenz  $f$  der Struktur (siehe [Abschnitt 4.1](#)), die für die Systemantwort von Bedeutung ist, sollte für die Berechnung des Zeitschrittes verwendet werden,  $\Delta t \leq 1 / 20f$



Die empfohlenen Zeitschritte führen zu genauen Verformungen und Kräften, wenn Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für Sie von Interesse sind, müssen nochmals kleinere Zeitschritte gewählt werden.

### Lager zuweisen

- ☒ Identisch an allen Lagern
- ☐ Unterschiedlich in Lagersätzen (Mehrpunkt)



Die Lager, die durch das Akzelerogramm in Erregung versetzt werden, müssen zugewiesen werden. Wenn alle Lager identisch angeregt werden sollen, können diese Lager Knoten-, Linien- oder Flächenlager sein. Die Multipunkt-Option ist im Moment nur für Knotenlager verfügbar.

Über die Schaltfläche [Neu] können mehrere Lagersätze angelegt werden. Unter Verwendung des Drop-Down-Menüs kann zwischen den vorhandenen Sätzen hin- und hergewechselt werden. Um einen bestimmten Satz zu löschen, wird die Schaltfläche [Löschen] verwendet. Für jeden Satz muss eine Liste an gelagerten Knoten vorhanden sein. Es ist eine händische Eingabe möglich oder die Auswahl kann in der Grafik über die Pick-Funktion erfolgen.

### Akzelerogramm zuweisen

Die verfügbaren Akzelerogramme werden aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt. Es können verschiedene Multiplikationsfaktoren in jede Richtung angewendet werden.



Die Erregungsrichtung kann in der  $X$ - $Y$ -Ebene um die  $Z$ -Achse rotieren. Wenn das Akzelerogramm beispielsweise die Struktur um  $45^\circ$  rotierend um die  $Z$ -Achse erregen soll, wird nur die  $X$ -Richtung und  $\alpha = 45^\circ$  eingegeben.



Für jeden Lagersatz können verschiedene Akzelerogramme zugewiesen werden.

### Integrationsparameter

In *RF-DYNAM Pro* können die Zeitschritte automatisch entsprechend dem zugewiesenen Akzelerogramm ausgewählt werden oder es können Zeitschritte und die maximale Zeit händisch definiert werden. Es werden Ergebnisse für jeden einzelnen Zeitschritt erzeugt.

### Anfangsverformung

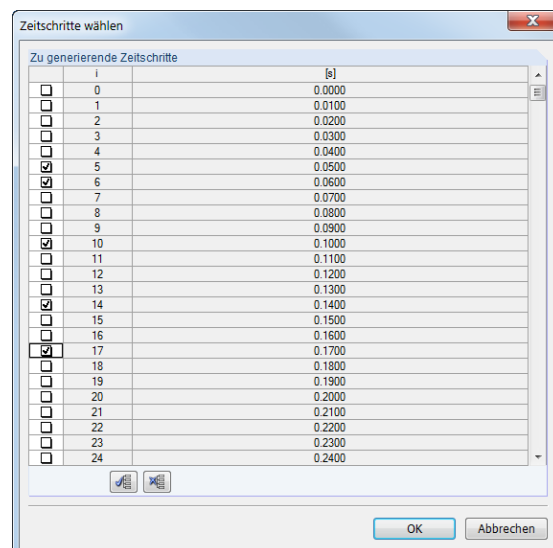
Wenn die *Anfangsverformungen aus Lastfall* ausgewählt werden, ist es möglich Anfangsbedingungen direkt aus einem Lastfall zu importieren; diese Bedingungen gelten beim Zeitschritt  $t = 0 \text{ sec}$ .

### Export von Lastfällen und Ergebniskombinationen

Es können Lastfälle für einzelne Zeitschritte durch Aktivieren des Kontrollfeldes *Lastfälle generieren* exportiert werden. Der Lastfalltyp wird aus der Drop-Down-Liste darunter ausgewählt.



Die Zeitschritte, die exportiert werden sollen, werden aus der Liste, dargestellt in [Bild 2.24](#), ausgewählt.



**Bild 2.24:** Maske zum Auswählen von Zeitschritten für den Lastfallexport im Zeitverlaufsverfahren.

Eine Ergebniskombination (*EK*) wird als umhüllendes Ergebnis mit Maximal- und Minimalwerten von allen Zeitschritten generiert, wenn *Ergebniskombination generieren* ausgewählt wird.

### Strukturdämpfung

In *RF-DYNAM Pro* ist die strukturelle viskose Dämpfung verfügbar. Eine Eingabe kann mit den Rayleigh-Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  oder durch die Lehrschen Dämpfungswerte  $D_i$  erfolgen. Der Lehrsche Dämpfungswert kann für jede Form der Struktur gleich oder unterschiedlich sein. Das Register *Dämpfung* ist in [Bild 2.25](#) dargestellt.

Form Nr.	Dämpfung D [-]	Kommentar
1	0.050	
2	0.050	
3	0.050	
4	0.050	
5	0.050	
6	0.010	
7	0.010	
8	0.010	
9	0.010	
10	0.010	
11	0.010	
12	0.010	
13	0.010	
14	0.010	
15	0.010	
16	0.000	
17	0.000	
18	0.000	
19	0.000	
20	0.000	
21	0.000	
22	0.000	
23	0.000	
24	0.000	
25	0.000	
26	0.000	
27	0.000	
28	0.000	
29	0.000	
30	0.000	
31	0.000	

**Bild 2.25:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Dämpfung*.

Mit den Rayleigh-Koeffizienten ist die Dämpfungsmatrix **C** definiert als

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (2.12)$$

unter Verwendung der Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$ . Die Rayleigh-Dämpfungskoeffizienten werden für die direkte Integration verwendet, bei der eine explizite Dämpfungsmatrix **C** erforderlich ist, die nicht eine Diagonalmatrix sein muss. Für weitere Informationen und die Vor- und Nachteile der Rayleigh-Dämpfung siehe zum Beispiel [10].

Für die Modalanalyse werden die Lehrschen Dämpfungswerte  $D_i$  verwendet, wobei die Struktur in ihre einzelnen Eigenwerte entkoppelt wird. Hier ist die Dämpfungsmatrix **C** eine Diagonalmatrix. Die Lehrschen Dämpfungswerte sind für jede einzelne Form  $i$  als Faktor zwischen der bestehenden und der kritischen Dämpfung folgendermaßen definiert:

$$D_i = \frac{c_i}{2 \cdot m_i \cdot \omega_i} \quad (2.13)$$

wobei  $c_i$  für die Einträge in der diagonalen Dämpfungsmatrix,  $m_i$  für die Modalmassen und  $\omega_i$  für die Kreisfrequenzen des Systems stehen.

In *RF-DYNAM Pro* werden die Dämpfungswerte je nach Berechnungsverfahren intern konvertiert. Für die Konvertierung wird das folgende Gleichungssystem für zwei unabhängige Frequenzen des Systems gelöst:

$$D_r = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_r} + \beta \omega_r \right) \quad (2.14)$$

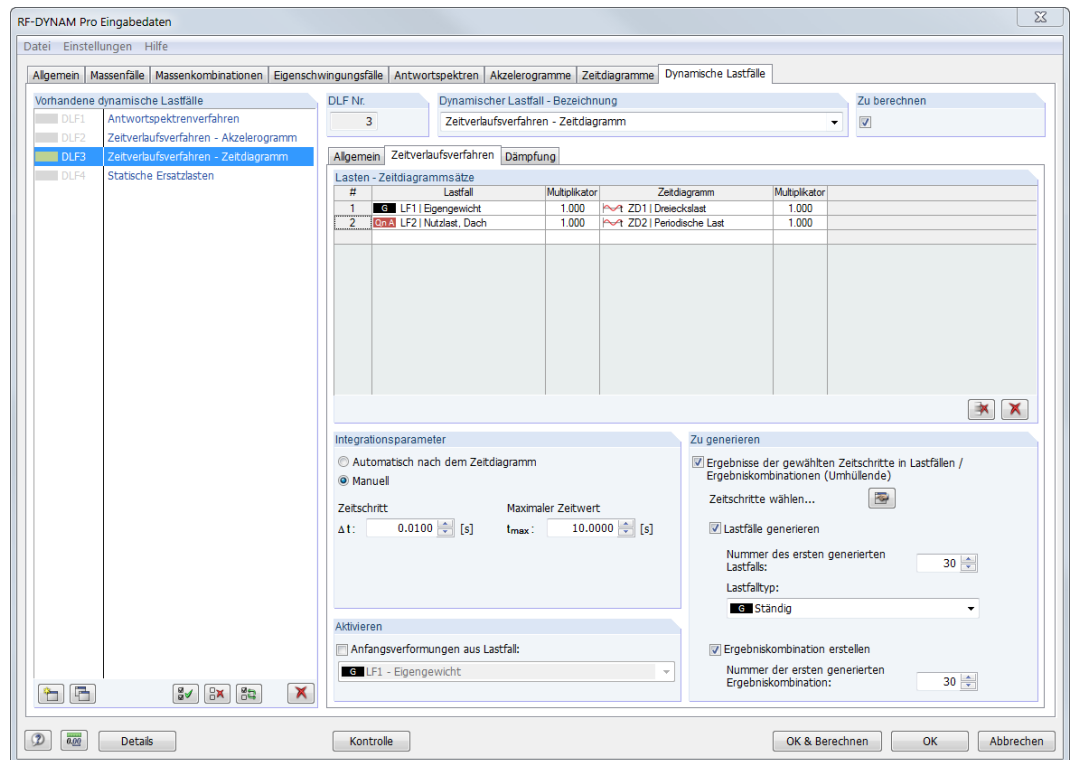


Wenn die direkte Integration für das Zeitverlaufsverfahren verwendet wird (festgelegt in *Allgemein*, siehe Bild 2.19), können die Lehrschen Dämpfungswerte nur für die ersten beiden Formen des Systems eingegeben werden. Das liegt an der internen Konvertierung zu Rayleigh-Koeffizienten (Gleichung 2.14). Wenn nur ein Lehrscher Dämpfungswert angegeben ist oder nur ein Eigenwert in den Eigenschwingungsfällen (ESFs) berechnet wird, wird der Koeffizient  $\beta$  auf Null gesetzt und die Gleichung 2.14 wird verwendet, um  $\alpha$  zu berechnen.

## 2.8.3 Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen

Ein Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen wird durchgeführt, wenn die entsprechende Optionsschaltfläche in [Bild 2.19](#) ausgewählt ist; diese Option ist nur in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* verfügbar.

Die entsprechenden Unterregister, wenn ein Zeitverlaufsverfahren durchgeführt wird, sind *Allgemein*, *Zeitverlaufsverfahren* und *Dämpfung*. Das Register *Zeitverlaufsverfahren* ist in [Bild 2.26](#) dargestellt. Es ist geringfügig anders aufgebaut als das Register *Zeitverlaufsverfahren*, das für Akzelerogramme verwendet wird. Hier können nicht nur Lager, sondern auch beliebige Punkte der Struktur in jede Richtung durch die definierten Zeitdiagramme erregt werden.



**Bild 2.26:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Zeitverlaufsverfahren (Zeitdiagramme)*.

### Modalanalyse im Vergleich zu Direkte Integration

Im Register *Allgemein* (siehe [Bild 2.19](#)) kann zwischen der Modalanalyse und der direkten Integration gewählt werden. Die Löser sind identisch mit denen, die für das Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen verwendet werden; eine detaillierte Beschreibung erfolgte in [Abschnitt 2.8.2](#).

### Lasten - Zeitdiagrammsätze

Lastfälle, die im Hauptprogramm *RFEM* definiert wurden, werden mit den definierten *Zeitdiagrammen* (siehe [Abschnitt 2.7](#)) kombiniert zu *Lasten - Zeitdiagrammsätzen*. Um die Erregung der Struktur zu definieren, wird aus der Tabelle ein Lastfall und ein Zeitdiagramm ausgewählt. Es können Faktoren sowohl für den Lastfall als auch für das Zeitdiagramm angewendet werden.



Statische Lastfälle sind zwingend erforderlich, wenn ein Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen durchgeführt wird. Der statische Lastfall definiert die Größe, die Richtung und die Positionen der Erregung. Knoten-, Linien-, Flächen-, freie und generierte Lasten können mit einer zeitlich veränderbaren Funktion kombiniert werden.

Es können mehrere solcher *Lasten - Zeitdiagrammsätze* miteinander kombiniert werden, einfach indem mehrere Zeilen in der Tabelle ausgefüllt werden (siehe [Bild 2.26](#)). Dies ist erforderlich, um

eine Erregung zu simulieren, die zeitlich veränderbar ist, aber auch ihre Position verändert, z.B. ein Fußgänger, der über eine Brücke geht.

### Integrationsparameter

In *RF-DYNAM Pro* können die Zeitschritte automatisch entsprechend dem zugewiesenen Zeitdiagramm ausgewählt werden. Für harmonische Zeitdiagramme ist die maximale Zeit auf  $t_{max} = 10 \cdot 2\pi/\omega$  eingestellt, was dem Zehnfachen der Periodenlänge entspricht. Für transiente Zeitdiagramme wird die maximale Zeit aus dem benutzerdefinierten Zeitdiagramm übernommen. Wenn die automatischen Einstellungen nicht passen, können die Zeitschritte und die maximale Zeit manuell definiert werden. Es werden Ergebnisse für jeden einzelnen Zeitschritt erzeugt.

### Anfangsverformung

Wenn *Anfangsverformungen aus Lastfall* ausgewählt werden, ist es möglich, Anfangsbedingungen direkt aus einem Lastfall zu importieren; diese Bedingungen gelten beim Zeitschritt  $t = 0 \text{ sec}$ .

### Export von Lastfällen und Ergebniskombinationen

Es können Lastfälle für einzelne Zeitschritte exportiert werden, indem *Lastfälle generieren* ausgewählt wird. Der Lastfalltyp wird aus der Drop-Down-Liste darunter ausgewählt.



Es können die Zeitschritte, die exportiert werden sollen, aus der Liste, dargestellt in [Bild 2.24](#) auf [Seite 33](#), ausgewählt werden.

Es werden Ergebniskombinationen (EKs) als umhüllendes Ergebnis mit Maximal- und Minimalwerten von allen Zeitschritten generiert, wenn *Ergebniskombination generieren* ausgewählt wird.

### Strukturdämpfung

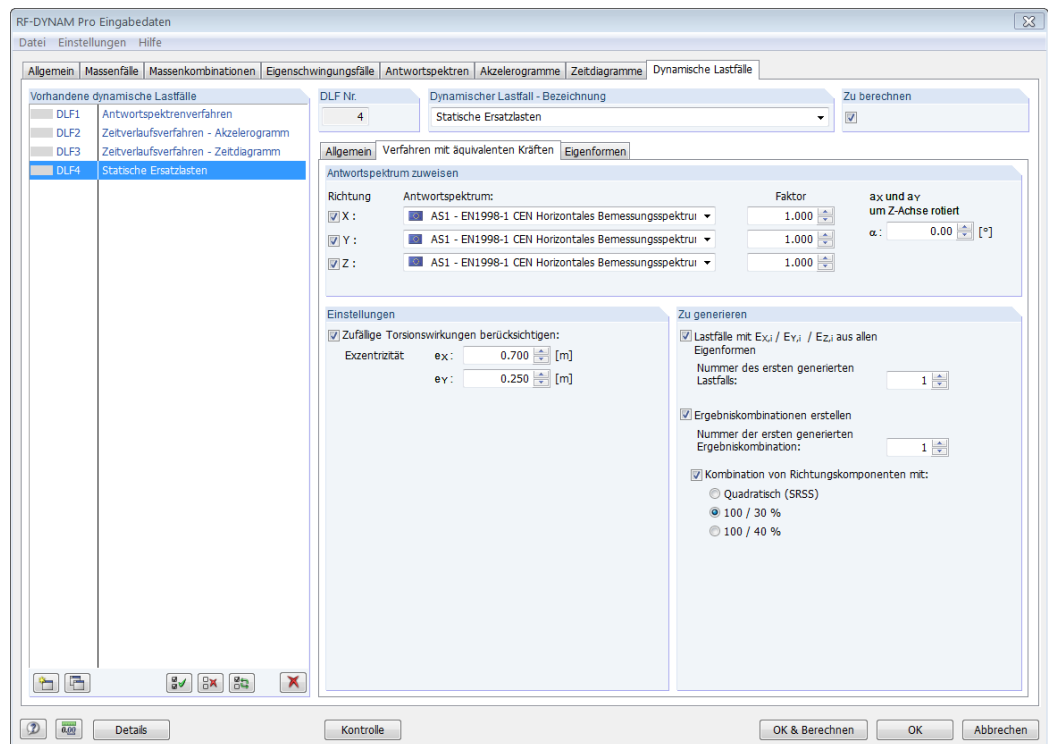
Die Einstellungen für die Strukturdämpfung wurden in [Abschnitt 2.8.2](#) ausführlich beschrieben und sind für das Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen identisch.

## 2.8.4 Ersatzlastverfahren

Das Ersatzlastverfahren wird durchgeführt, wenn die entsprechende Optionsschaltfläche in [Bild 2.19](#) ausgewählt ist; diese Option gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*. Das Ersatzlastverfahren in *RF-DYNAM Pro* erfolgt auf Grundlage des multimodalen Antwortspektrenverfahrens. Die wesentlichen Unterschiede zum *Antwortspektrenverfahren* im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* (in [Abschnitt 2.8.1](#) beschrieben) sind im Folgenden aufgeführt:

- Lastfälle mit Ersatzlasten werden in *RFEM* exportiert, getrennt für jede Form und jede Erregungsrichtung
- Die Berechnung von Lastfällen erfolgt im Hauptprogramm *RFEM*
- Zufällige Torsionswirkungen können automatisch berücksichtigt werden
- Gesamterdbebenkräfte können sehr einfach für jede Eigenform berechnet werden
- Die Modalantworten werden mit der *SRSS*-Regel kombiniert unter Verwendung einer *Vorzeichen bewahren* Funktion [11]
- Ergebniskombinationen werden einzeln für jede Erregungsrichtung (kombinierte Modalantworten) und für die Kombination von Ergebnissen aus verschiedenen Erregungsrichtungen erzeugt
- Die Ergebnisse sind Schritt für Schritt reproduzierbar
- Alle Lager werden identisch angeregt (keine Multipunkt Erregung)

Die entsprechenden Unterregister, wenn ein Ersatzlastverfahren durchgeführt wird, sind *Allgemein*, *Verfahren mit äquivalenten Kräften* und *Eigenformen*. Das Register *Verfahren mit äquivalenten Kräften* ist in [Bild 2.27](#) dargestellt.



**Bild 2.27:** Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Verfahren mit äquivalenten Kräften*.

### Antwortspektrum zuweisen

In jede Richtung kann ein unterschiedliches Antwortspektrum zugeordnet werden. Es muss zumindest eine der Richtungen ausgewählt sein. Die vorhandenen Antwortspektren müssen aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt werden. Der Multiplikationsfaktor kann für jede Richtung frei gewählt werden.

ax und ay  
um Z-Achse rotieren  
 $\alpha$ : 0.00 [°]

Die Erregungsrichtung kann in der  $X$ - $Y$ -Ebene um die  $Z$ -Achse rotieren. Wenn die Antwortspektren beispielsweise die Struktur um  $45^\circ$  rotierend um die  $Z$ -Achse erregen sollen, wird nur die  $X$ -Richtung aktiviert und  $\alpha = 45^\circ$  eingegeben.

### Zufällige Torsionswirkungen

ex: 0.700 [m]  
ey: 0.250 [m]

*RF-DYNAM Pro* berücksichtigt zufällige Torsionswirkungen automatisch, wenn das Kontrollfeld ausgewählt wird und die Exzentrizitäten  $e_X$  und  $e_Y$  eingegeben werden. Dies ist zum Beispiel im **EC8 Abschnitt 4.3.2 und 4.3.3.3.3** [1] geregelt und gilt für andere internationale Baunormen in ähnlicher Form. Die Exzentrizitäten  $e_X$  und  $e_Y$  definieren die Verschiebung des Massenschwerpunktes, um Unsicherheiten in der Anordnung der Massen zu berücksichtigen.



Wenn Lastfälle mit generierten Ersatzlasten exportiert werden, werden nun zwei LFs für jede Form und jede Richtung generiert. Einer mit positiven Torsionsmomenten und der andere mit negativen Torsionsmomenten. *RF-DYNAM Pro* erzeugt eine Alternativkombination dieser zwei LFs.

### Kombinationsregeln

Im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* können mit der *SRSS*-Regel die verschiedenen Modalantworten kombiniert werden. Im Abschnitt *Zu Generieren* können die zu exportierenden *EKs* ausgewählt werden. Die Modalantworten der Struktur und die Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen werden kombiniert.

Die Modalantworten werden kombiniert unter Verwendung der *Quadratsummenwurzel-Regel* (*SRSS*-Regel). Ergebnisse werden kombiniert, die Vorzeichen gehen bei der Standardform der *SRSS*-Regel verloren. Die Ergebnisse  $E$  werden mit der *SRSS*-Regel folgendermaßen kombiniert:

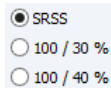
$$E_{SRSS} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_p^2} \quad (2.15)$$

wobei  $E_p$  die Ergebnisse sind, die sich aus  $p$ -Formen der Struktur ergeben.

In *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* wird eine modifizierte Art der *SRSS*-Regel angewendet, um die Vorzeichen zu erhalten. Diese geänderte *SRSS*-Regel wurde erstmals von Katz [11] veröffentlicht und ist folgendermaßen definiert:

$$E_{SRSS} = \sum_{i=1}^p f_i \cdot E_i \quad \text{mit} \quad f_i = \frac{E_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^p E_j^2}} \quad (2.16)$$

Wenn diese Formel verwendet wird, sind die Ergebniskombinationen in sich konsistent. Zugehörige Schnittgrößen werden kleiner.



Die Schnittgrößen aus verschiedenen Erregungsrichtungen können quadratisch mit der *SRSS*-Regel kombiniert werden oder die 100% / 30% (40%)-Regel aus **EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.5 [1]** wird angewendet. Die *SRSS*-Regel wird wie in [Gleichung 2.15](#) definiert angewendet, aber nun sind  $i = 1..p$  die Erregungsrichtungen  $X, Y$  und  $Z$ .

### Export von Last- und Ergebniskombinationen

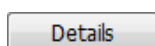
Wenn das Kontrollfeld *Lastfälle* ausgewählt wird, werden Lastfälle in *RFEM* einzeln für jede Form und jede Erregungsrichtung exportiert. Wenn *Ergebniskombinationen erstellen* ausgewählt wird, werden mehrere Ergebniskombinationen automatisch erzeugt.

- *EKs*, die die Kombination der Modalantworten (*SRSS*) einzeln für jede Richtung enthalten.
- *EKs*, die die Ergebnisse aus den verschiedenen Erregungsrichtungen kombinieren. Eine *EK* wird für die *SRSS*-Regel erzeugt, maximal drei *EKs* werden für die 100% / 30% (40%)-Regel erzeugt.

### Wahl der Eigenform

In *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* steht ein multimodales Antwortspektrenverfahren zur Verfügung; es können so viele Formen ausgewählt werden wie für die Bemessung erforderlich sind. Das Register *Eigenform* und die Einstellungen wurden detailliert in [Abschnitt 2.8.1](#) besprochen und sind für das Ersatzlastverfahren identisch.

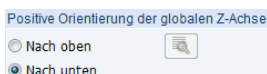
## 2.9 Allgemeine Einstellungen im Dialog Details



Der Dialog *Details* kann über die Schaltfläche [Details] aufgerufen werden. Der Dialog kann auch über **Einstellungen** → **Details** aufgerufen werden. In diesem Dialog können allgemeine Parameter gesetzt werden, die für die gesamte dynamische Berechnung gültig sind, unabhängig von definierten Fällen innerhalb des Moduls. Der Dialog ist in [Bild 2.28](#) dargestellt.

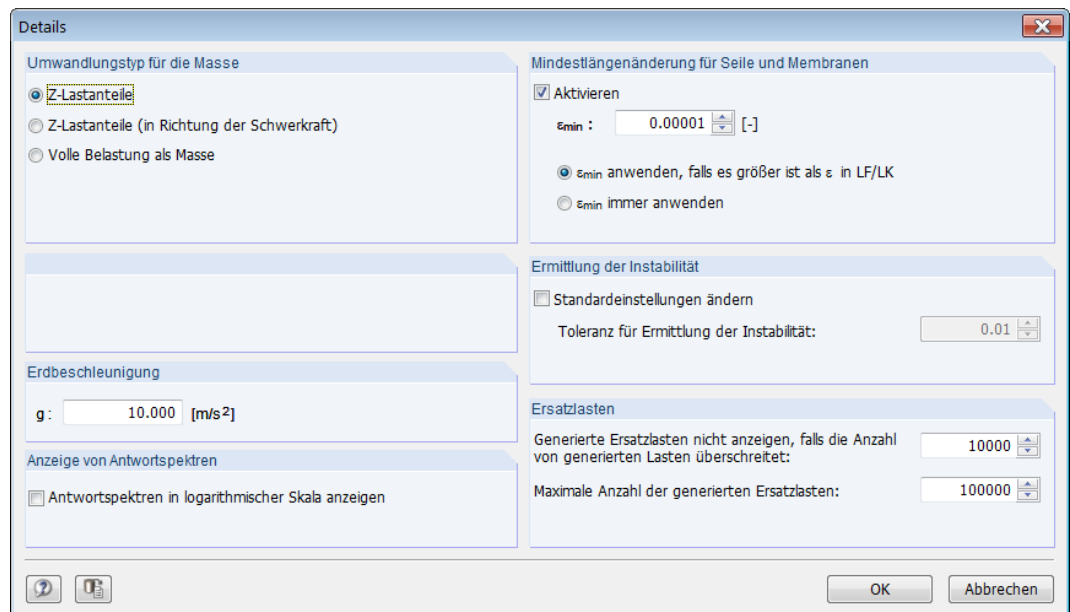
### Umwandlungstyp für die Masse

In [Abschnitt 2.2](#) wurde der Massenimport aus Lastfällen erklärt. Sie können die Lasten, die importiert werden sollen, verändern, indem Sie zwischen den Optionsschaltflächen, dargestellt in [Bild 2.28](#), hin- und herwechseln. Es können nur die  $Z$ -Komponenten der Lasten in beide globale  $Z$ -Richtungen oder nur in Richtung der Schwerkraft importiert werden. Die dritte Option importiert Gesamtlasten ohne deren Richtung zu berücksichtigen. Massen verhalten sich anders als Lasten. Sie müssen als Massepunkt betrachtet werden, nicht als Last, die in eine spezifische Richtung wirken. Somit werden verschiedene Lasten, die an einem FE-Knoten wirken, zusammengefasst.



Die Richtung der Schwerkraft wird in Richtung der globalen  $Z$ -Achse definiert, wenn die positive Richtung nach unten festgelegt ist und wird entgegen der Richtung der globalen  $Z$ -Achse definiert, wenn die positive Richtung der  $Z$ -Achse nach oben festgelegt ist. Die Einstellungen, wie links dargestellt, können unter **Bearbeiten** → **Modelldaten** → **Basisangaben** vorgenommen werden.





**Bild 2.28:** Dialog *Details* zur Anpassung der allgemeinen Parameter für das Modul *RF-DYNAM Pro*.

### Erdbeschleunigung

Die Erdbeschleunigung  $g$  [ $m/s^2$ ] kann geändert werden. Der Standardwert beträgt  $g = 10 m/s^2$  wie er auch im Hauptprogramm *RFEM* verwendet wird.

### Anzeige der Antwortspektren

Die Anzeige der Antwortspektren kann geändert werden, dargestellt in [Bild 2.8](#) und [2.22](#). Die Standarddarstellung verwendet eine lineare x-Achse, aber die Änderung zu einer logarithmischen Skala ist durch Aktivieren des Kontrollfeldes möglich.

### Mindestlängenänderung für Seile und Membranen

Für diesen speziellen Stabtyp ist eine Mindestlängenänderung erforderlich. Wenn diese Grenze zu niedrig angesetzt wird, sind die erreichten Eigenwerte nicht realistisch und es werden nur lokale Eigenformen bestimmt. Der Standardwert eignet sich in den meisten Fällen. Weitere Informationen zu Seilen gibt es im *RFEM-Handbuch* in [Abschnitt 4.17](#).

### Ermittlung der Instabilität

Die Stabilität einer Struktur kann analysiert werden, der Standardwert in *RF-DYNAM Pro* beträgt 0,01, was zu einer sehr sensiblen Ermittlung von Instabilität und einer frühen Abbruchschranke führt. Weitere Informationen dazu im *RFEM-Handbuch* in [Abschnitt 7.3.3](#).

### Ersatzlasten

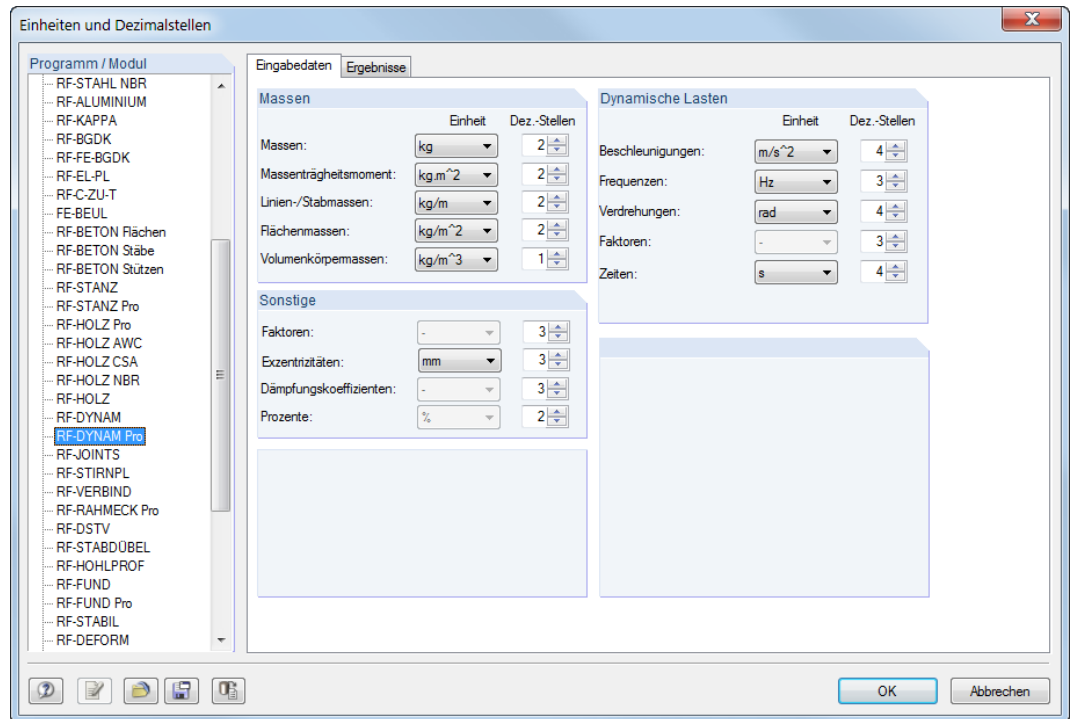
Wie in [Abschnitt 2.8.4](#) beschrieben werden Lastfälle mit den erzeugten Ersatzlasten exportiert. Lasten werden nur graphisch dargestellt, wenn weniger als 10000 Lasten generiert werden. Dieser Wert kann in der Maske *Details* geändert werden. Es ist zu beachten, dass die graphische Anzeige von mehr als 10000 Lasten langsam ist. Die maximale Anzahl an Lasten, die *RFEM* erzeugen und in *LFs* exportieren kann, beträgt 99999. Da Ersatzlasten an jedem FE-Knoten erzeugt werden, wird nur ein vollständiger Satz an Ersatzlasten ausgegeben, wenn die Struktur weniger als 99999 FE-Knoten hat. Wenn die Struktur mehr FE-Knoten hat, werden die kleinsten Ersatzlasten vernachlässigt und es werden nur 99999 Lasten erzeugt. Im Dialog *Details* kann die maximale Anzahl der generierten Ersatzlasten geändert werden.



### 2.10 Einheiten und Dezimalstellen



Die Maske *Einheiten und Dezimalstellen* kann mit der links dargestellten Schaltfläche aufgerufen werden; die Maske ist in [Bild 2.29](#) dargestellt.



**Bild 2.29:** Darstellung des Dialogs *Einheiten und Dezimalstellen*, in dem die Einheiten und Dezimalstellen der Ergebnisdaten aus *RF-DYNAM Pro* angepasst werden können.

Das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro* wird in der Liste der Module ausgewählt. Das Register *Eingabedaten* ist geöffnet und Einheiten können aus den Drop-Down-Menüs ausgewählt und Dezimalstellen können angepasst werden.

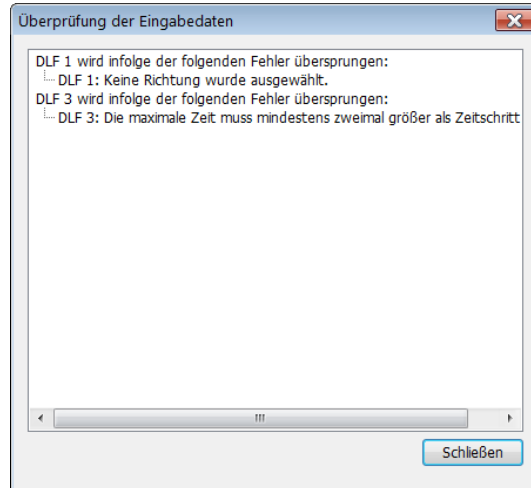
# 3 Berechnung

## 3.1 Kontrolle

Kontrolle

Bevor die Berechnung gestartet wird, können die Eingabedaten überprüft werden, ohne das Zusatzmodul zu beenden. Dazu wird [Kontrolle] im unteren Bereich des Moduls aufgerufen.

Im Modul wird die Maske *Überprüfung der Eingabedaten* angezeigt, in der die Warn- und Fehlermeldungen erscheinen. Wenn keine Fehler gefunden wurden, erscheint die Meldung *Es wurden keine Konsistenzfehler gefunden*.



**Bild 3.1:** Maske *Überprüfung der Eingabedaten* mit Warn- und Fehlermeldungen.

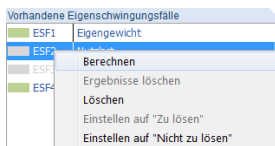


Mit einem Klick auf [OK & Berechnen] wird die Kontrolle ebenfalls durchgeführt. Wenn Fehler auftreten, wird die Maske *Überprüfung der Eingabedaten* angezeigt und man kann entscheiden, ob die Berechnung durchgeführt oder abgebrochen werden soll.

## 3.2 Start der Berechnung

OK & Berechnen

Die Berechnung wird mit einem Klick auf die Schaltfläche [OK & Berechnen] gestartet. Es werden nur die Fälle (*ESFs* und *DLF*) berechnet, für die keine Ergebnisse verfügbar sind und die als zu berechnen ausgewählt sind (Kontrollfeld *Zu Berechnen*). Das Zusatzmodul wird beendet, sobald die Berechnung abgeschlossen ist.



Um die Berechnung eines einzelnen Eigenschwingungsfalles (*ESFs*) oder eines dynamischen Lastfalls (*DLFs*) zu starten, kann ein Rechtsklick auf den spezifischen Fall erfolgen und *Berechnen* ausgewählt werden. Es wird nur der ausgewählte Fall in *RF-DYNAM Pro* berechnet. Sobald die Berechnung abgeschlossen ist, bleibt das Modul offen, die Farbe des ausgewählten Falls ändert sich von Grau auf Grün. Wenn ein *DLF* zur Berechnung ausgewählt wird, wird auch der zugewiesene *ESF* berechnet.

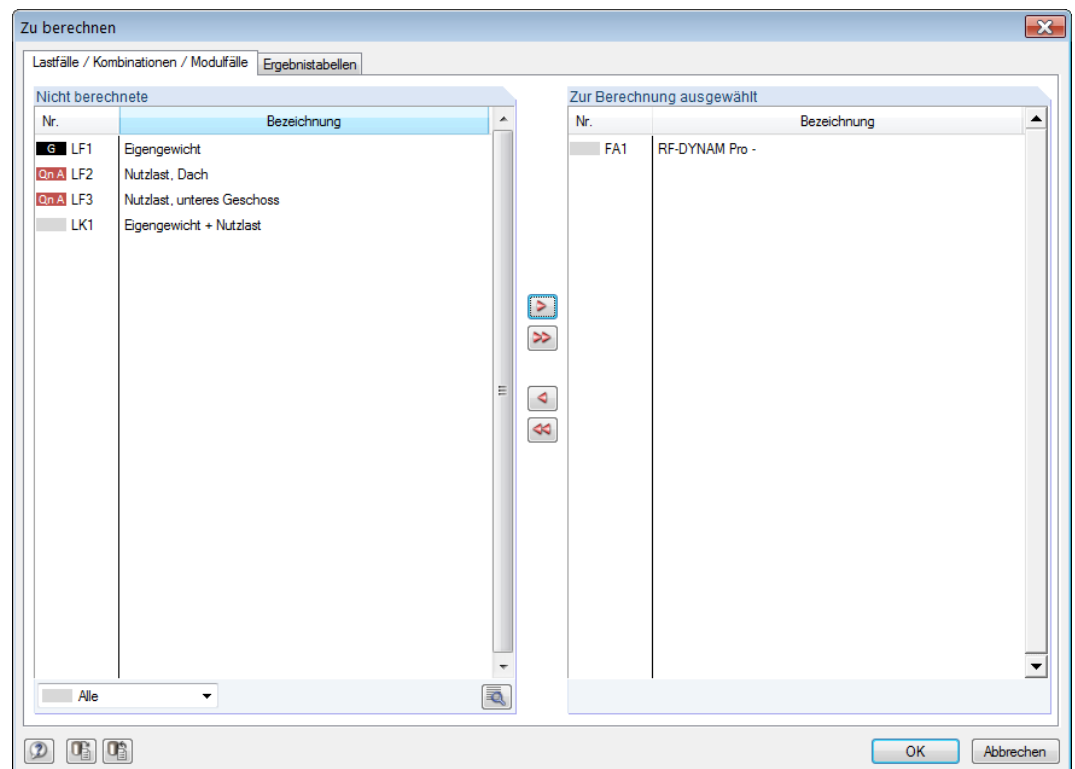


Die Berechnung kann auch in der RFEM-Oberfläche gestartet werden. Um den *RF-DYNAM Pro*-Fall direkt zu berechnen, wählen Sie diesen aus der RFEM-Symboleiste aus, wie in **Bild 3.2** dargestellt. Mit einem Klick auf die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] wird die Berechnung gestartet. Es werden nur die Fälle (*ESFs* und *DLF*) berechnet, für die keine Ergebnisse verfügbar sind und die als zu berechnen ausgewählt sind (Kontrollfeld *Zu Berechnen*).

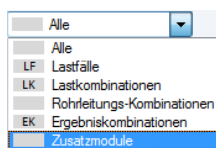


**Bild 3.2:** Direkte Berechnung eines *RF-DYNAM Pro*-Falls in RFEM

In der Maske *Zu berechnen* (**Berechnung** → **Zu berechnen**) sind sowohl die Fälle des Zusatzmoduls als auch die Lastfälle und Lastkombinationen aufgelistet. Dies ist in [Bild 3.3](#) dargestellt.



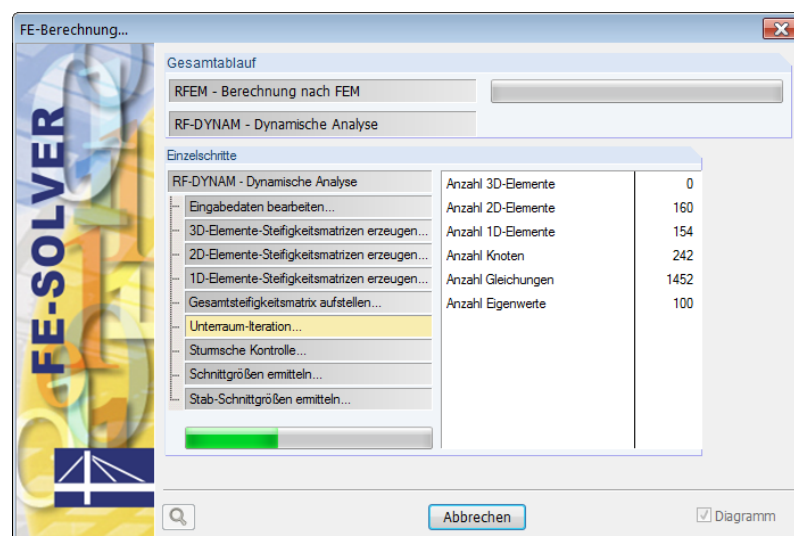
**Bild 3.3:** Dialog *Zu berechnen*



Die verfügbaren Fälle können mit dem Drop-Down-Menü, dargestellt auf der linken Seite, gefiltert werden.

Mit der Schaltfläche oder werden die selektierten *RF-DYNAM Pro*-Fälle in die rechte Liste übergeben. [OK] startet dann die Berechnung. Es werden alle Fälle (*ESFs* und *DLFs*) berechnet, für die noch keine Ergebnisse verfügbar sind und die als zu berechnen ausgewählt sind (Kontrollfeld *Zu Berechnen*).

Wenn die Berechnung gestartet wurde, kann der Berechnungsvorgang in einem separaten Dialog, dargestellt in [Bild 3.4](#), verfolgt werden.



**Bild 3.4:** Berechnungsvorgang in *RF-DYNAM Pro*.

### 3.3 Verfügbarkeit der Ergebnisse

Der Lösch- und Berechnungsvorgang in *RF-DYNAM Pro* ist sehr differenziert. Fälle wie Eigenschwingungsfälle (*ESFs*) und dynamische Lastfälle (*DLFs*) können einzeln berechnet werden; ebenso können die Ergebnisse einzeln gelöscht werden, indem das Kontextmenü verwendet wird (Rechtsklick auf den spezifischen Fall). Das Kontextmenü bietet auch die Möglichkeit, den Fall zu löschen, den Fall auf *Zu Berechnen* oder auf *Nicht zu lösen* einzustellen.

Ein Fall wird in Grau dargestellt, wenn keine Ergebnisse verfügbar sind. Ein Fall wird in Grün dargestellt, wenn Ergebnisse verfügbar sind, dann sind auch die exportierten *LFs* und *EKs* vorhanden. Die exportierten *EKs* und *LKs* sind eng mit den Ergebnissen verbunden und werden gelöscht, sobald die Ergebnisse des Falls gelöscht werden.

Ergebnisse eines spezifischen Falls werden gelöscht, wenn

- das Kontextmenü verwendet wird, um die Ergebnisse zu löschen
- etwas in den *ESFs* oder in den *DLFs* in *RF-DYNAM Pro* geändert wird
- sich zugewiesene Massenfälle (*MFs*), Massenkombinationen (*MKs*), Eigenschwingungsfälle (*ESFs*), Antwortspektren (*ASs*), Akzelerogramme (*BSs*) oder Zeitdiagramme (*ZDs*) ändern
- sich zugewiesene Lastfälle *LFs*, Lastkombinationen *LKs*, die in *RFEM* definiert sind, ändern
- exportierte *LFs* oder *EKs* gelöscht werden, die zu dem jeweiligen *DLF* gehören

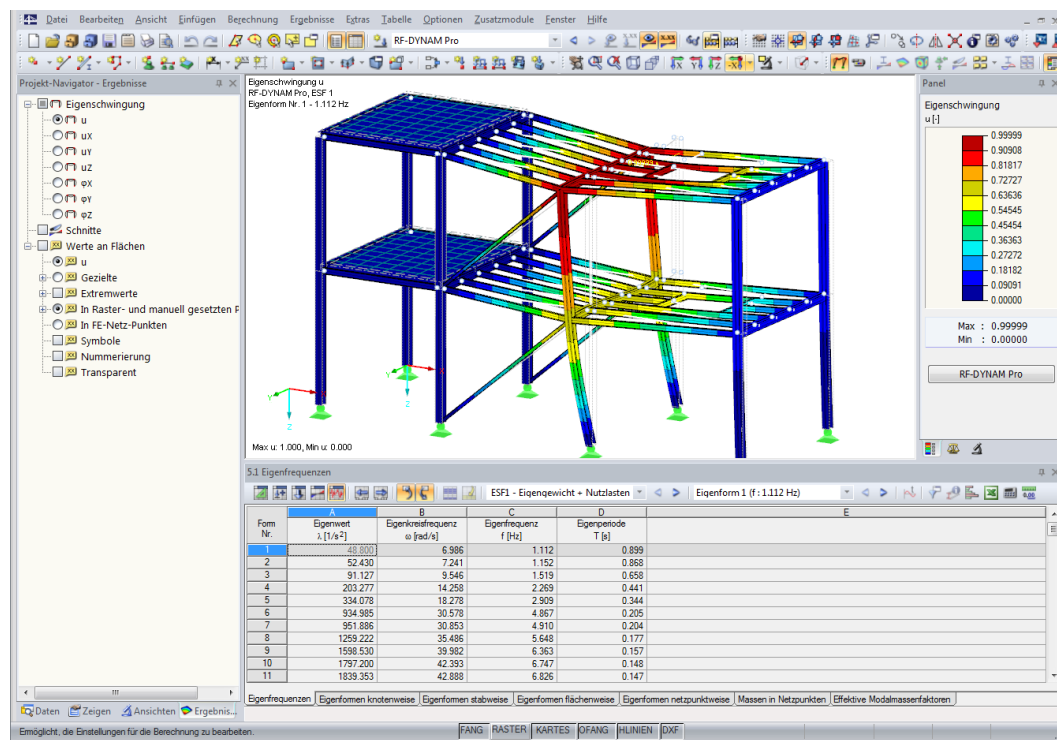
Ergebnisse eines spezifischen Falls werden nicht gelöscht, wenn

- sich nur die Bezeichnung eines Falls ändert
- sich in den *ESFs* die Skalierung der Eigenformen ändert

## 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse aus *RF-DYNAM Pro* sind im Hauptprogramm RFEM integriert. Die allgemeine Interpretation der Ergebnisse ist in **Kapitel 8** und in **Kapitel 9** des **RFEM-Handbuchs** beschrieben.

In **Bild 4.1** ist das Hauptprogramm RFEM dargestellt. Die Ergebnisse eines *Eigenschwingungsfalls* werden dargestellt, die erste Eigenform wird angezeigt und die Eigenfrequenzen werden in der Tabelle aufgelistet.




**Bild 4.1:** Ergebnisse eines *Eigenschwingungsfalls* im Hauptprogramm RFEM.

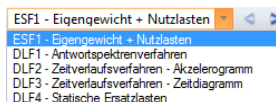
Der *Zeigen-Navigator* und der *Ergebnisse-Navigator* werden in **Abschnitt 3.4.3**, die *Tabellen* in **Abschnitt 3.4.4** und das *Steuerpanel* in **Abschnitt 3.4.6** des **RFEM-Handbuchs** erläutert. Hier im *RF-DYNAM Pro*-Handbuch werden nur die neu verfügbaren Ergebnisse erläutert.





Alle relevanten Ergebnistabellen der dynamischen Analyse können mit der Schaltfläche [Dynamische Analyse] aufgerufen werden.



Jede Ergebnistabelle, die in diesem Kapitel dargestellt ist, kann in *Excel* exportiert werden. Die Werte innerhalb der Tabellen werden als Zeichenketten gespeichert. Somit wird nur die Anzahl der angezeigten Dezimalstellen exportiert. Falls eine höhere Genauigkeit notwendig ist, können die Dezimalstellen in der Maske *Einheiten und Dezimalstellen* angepasst werden, die mit der Schaltfläche  aufgerufen wird.



Mit dem Drop-Down-Menü kann zwischen den vorhandenen *Eigenschwingungsfällen* und den *Dynamischen Lastfällen* hin- und hergewechselt werden. Es könne dazu auch die Schaltflächen  und  verwendet werden. Die angezeigten Ergebnistabellen hängen von dieser Auswahl ab. Dies wird im Folgenden näher erläutert.





Die Grafik in der Arbeitsebene von RFEM wird auch entsprechend dieser Auswahl aktualisiert. Alle Ergebnisse, die üblicherweise in RFEM verfügbar sind, sind auch in gleicher Weise für die Ergebnisse in *RF-DYNAM Pro* vorhanden. Die Interaktion zwischen Tabellen und Grafik funktioniert wie gewohnt in RFEM.

## 4.1 Eigenschwingungsfälle

Die Ergebnistabellen, die zu *Eigenschwingungsfällen* gehören, werden angezeigt, wenn ein *ESF*-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt wird. Die Ergebnistabellen 5.1 bis 5.7 gehören zu den *Eigenschwingungsfällen*. Diese Ergebnisse sind immer verfügbar. Sie gehören zum Modul *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen*. Die für die *Eigenschwingungsfälle* benötigten Eingabedaten wurden in [Abschnitt 2.4](#) erläutert.

Eigenform 1 (f: 1.112 Hz)

Mit dem Drop-down-Menü, dargestellt auf der linken Seite, oder den Schaltflächen  und  kann zwischen den verschiedenen verfügbaren Eigenformen in der Grafik hin- und hergewechselt werden. Die maximale Verformung, die in der Grafik angezeigt wird, hängt von der Skalierungsoption ab. Dies wurde in [Abschnitt 2.4.4](#) erläutert.

### Tabelle 5.1 Eigenfrequenzen

Tabelle 5.1 enthält die Eigenfrequenzen des ungedämpften Systems, die Ergebnistabelle ist in [Bild 4.2](#) dargestellt.

Form Nr.	A Eigenwert $\lambda$ [1/s <sup>2</sup> ]	B Eigenkreisfrequenz $\omega$ [rad/s]	C Eigenfrequenz $f$ [Hz]	D Eigenperiode $T$ [s]
1	48.800	6.986	1.112	0.899
2	52.430	7.241	1.152	0.868
3	91.127	9.546	1.519	0.658
4	203.277	14.258	2.269	0.441
5	334.078	18.278	2.909	0.344
6	934.985	30.578	4.867	0.205
7	951.886	30.853	4.910	0.204
8	1259.222	35.486	5.648	0.177
9	1598.530	39.982	6.363	0.157
10	1797.200	42.393	6.747	0.148
11	1839.353	42.888	6.826	0.147
12	2397.951	48.969	7.794	0.128
13	2710.808	52.065	8.286	0.121
14	3558.001	59.649	9.493	0.105
15	3648.944	60.406	9.614	0.104
16	4486.852	66.984	10.661	0.094

**Bild 4.2:** Ergebnistabelle 5.1: Eigenfrequenzen mit Eigenwerten  $\lambda$  [1/s<sup>2</sup>], Kreisfrequenzen  $\omega$  [rad/s], Eigenfrequenzen  $f$  [Hz] und Eigenperiode  $T$  [s].

Die Bewegungsgleichung eines Mehrfreiheitsgradsystems ohne Dämpfung wird mit den vier verfügbaren Eigenwertlösern berechnet, die in [Abschnitt 2.4.5](#) vorgestellt wurden. Weitere theoretische Details finden sich zum Beispiel bei Bathe [6] oder Tedesco [9]. Die Bewegungsgleichung ist definiert mit

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (4.1)$$

wobei  $\mathbf{M}$  die Massenmatrix darstellt, die in [Abschnitt 2.4.3](#) erläutert wurde,  $\mathbf{K}$  die Steifigkeitsmatrix und  $\mathbf{u}$  die Eigenformen, die Translations- und Rotationsanteile enthalten

$$\mathbf{u} = (u_X, u_Y, u_Z, \varphi_X, \varphi_Y, \varphi_Z)^T \quad (4.2)$$

Der Eigenwert  $\lambda$  [1/s<sup>2</sup>] ist mit der Kreisfrequenz  $\omega$  [1/s] mit  $\lambda_i = \omega_i^2$  verbunden. Die Eigenfrequenz  $f$  [Hz] wird dann mit  $f = \omega/2\pi$  abgeleitet, und die Eigenperiode  $T$  [s] ist der Kehrwert der Frequenz, die mit  $T = 1/f$  errechnet wird.

Für ein Mehrfreiheitsgradsystem (MDOF) gibt es mehrere Eigenwerte  $\lambda_i$  und zugehörige Eigenformen  $\mathbf{u}_i$ .

## Tabelle 5.2 - 5.5 Eigenformen

Jede Frequenz des Systems hat eine entsprechende Eigenform. Diese Eigenformen sind graphisch in der Arbeitsebene von RFEM dargestellt. Das Drop-Down-Menü kann verwendet werden, um zwischen den Eigenformen hin- und herzuwechseln. Dies wurde oben erläutert.

Alle Eigenformen sind in den Tabellen 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 enthalten. Der Unterschied in diesen Tabellen besteht darin, wie die Werte sortiert sind. In Tabelle 5.2 sind die normierten Verschiebungen  $u_X$ ,  $u_Y$  und  $u_Z$  und die Verdrehungen  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$  und  $\varphi_Z$  nach Knoten geordnet. Diese Tabelle ist in Bild 4.3 dargestellt.

5.2 Eigenformen knotenweise

ESF1 - Eigengewicht + Nutzlasten

Eigenform 1 (f: 1.112 Hz)

Knoten Nr.	Form Nr.	Normierte Verschiebungen			Normierte Verdrehungen		
		$u_X$ [-]	$u_Y$ [-]	$u_Z$ [-]	$\varphi_X$ [1/m]	$\varphi_Y$ [1/m]	$\varphi_Z$ [1/m]
1	1	-0.00287	-0.00155	0.00001	0.00004	0.00009	-0.00117
2	2	-0.00641	-0.98782	0.00304	-0.01141	-0.00059	0.00059
3	3	-0.00061	0.00064	0.00000	0.00002	0.00002	-0.00025
4	4	-0.00009	0.00009	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00004
5	5	-0.00042	0.00038	0.00000	0.00001	0.00001	-0.00017
6	6	-0.93222	0.00922	0.00230	-0.00199	0.00374	0.00290
7	7	-0.12315	-0.64377	0.01549	-0.12026	-0.01293	-0.00622
8	8	0.03905	-0.04234	0.00013	-0.00211	-0.00059	0.01624
9	9	0.70424	-0.70996	0.00066	-0.02643	-0.00393	0.28905
10	10	0.00897	-0.00343	-0.00001	-0.00005	0.00019	0.00141
11	11	0.00768	-0.00679	0.00000	-0.00021	0.00003	0.00280
12	12	-0.00186	0.00199	0.00000	0.00004	-0.00002	-0.00083
13	13	-0.00251	0.00257	0.00001	0.00003	-0.00006	-0.00108
14	14	-0.00146	0.00037	0.00002	0.00001	-0.00010	-0.00015
15	15	0.00016	-0.00014	0.00000	0.00000	0.00001	0.00006
16	16	0.00085	-0.00095	-0.00007	-0.00003	-0.00097	0.00044

Eigenfrequenzen | Eigenformen knotenweise | Eigenformen stabweise | Eigenformen flächenweise | Eigenformen netzpunktweise | Massen in Netzknoten | Effektive Modalmassenfaktoren

**Bild 4.3:** Ergebnistabelle 5.2: Eigenformen nach Knoten geordnet. Die normierten Verschiebungen  $u_X$ ,  $u_Y$  und  $u_Z$  und die normierten Verdrehungen  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$  und  $\varphi_Z$  werden dargestellt.

Tabelle 5.3 listet die Werte geordnet nach Stäben auf, Tabelle 5.4 geordnet nach Flächen und Tabelle 5.5 geordnet nach Netzknoten. Wenn keine Flächen im Modell vorhanden sind, ist die Tabelle 5.4 nicht verfügbar.

Der Maximalwert von  $u$  und  $\varphi$  hängt von der gewählten Skalierungsoption ab, die in Abschnitt 2.4.4 erläutert wurde. Die normierten Verschiebungen  $u$  sind dimensionlos und die normierten Verdrehungen  $\varphi$  werden in  $1/m$  angegeben. Diese Einheiten resultieren aus dem Skalierungsprozess.

## Tabelle 5.6 Massen in Netzknoten

Abhängig von den importierten Massen (siehe Abschnitt 2.2), von den Einstellungen in der Maske Details (siehe Abschnitt 2.9) und vom endgültig zugewiesenen Massenfall oder von der zugewiesenen Massenkombination (siehe Abschnitt 2.4.2) werden die Massen in Netzknoten berechnet. Es werden hier nur die Massen in den translatorischen Richtungen  $m_X$ ,  $m_Y$  und  $m_Z$  angegeben. Die Summe der Massen wird am Ende der Tabelle angezeigt. Die Tabelle ist in Bild 4.4 dargestellt. Darüber hinaus sind die Positionen der Netzknoten im globalen Koordinatensystem aufgelistet.

## Tabelle 5.7 Effektive Modalmassenfaktoren

Die Tabelle 5.7 gibt die Modalmassen  $M_i$ , die effektiven Modalmassen  $m_e$  und die effektiven Modalmassenfaktoren  $f_{me}$  an; die Tabelle ist in Bild 4.5 dargestellt. Die effektiven Modalmassen beschreiben, wie viel Masse durch jede Eigenform des Systems in jede Richtung aktiviert wird.

Die Modalmasse wird definiert mit

$$M_i = \mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{u}_i \quad (4.3)$$

wobei  $\mathbf{u}_i$  der Eigenvektor einer Eigenform  $i$  ist, wie in der Gleichung 4.2 definiert, und  $\mathbf{M}$  die Massenmatrix, die in Abschnitt 2.4.3 erläutert wurde. Die Modalmasse  $M_i$  ist unabhängig von der Richtung. Die Modalmasse ändert sich je nach gewählter Skalierungsoption für die Eigenformen (siehe Abschnitt 2.4.4); wenn die Option  $\mathbf{u}_i^T \mathbf{M} \mathbf{u}_i = 1 \text{ kg}$  ausgewählt ist, gilt für alle Modalmassen  $M_i = 1 \text{ kg}$ .



5.6 Massen in Netzknoten

ESF1 - Eigengewicht + Nutzlasten

Eigenform 1 (f: 1.112 Hz)

FE-Netz PunktNr.	Objekt	Nr.	X [m]	Stelle Y [m]	Z [m]	m <sub>x</sub> [kg]	Masse m <sub>y</sub> [kg]	m <sub>z</sub> [kg]
34	Stab	54	9.000	5.000	0.000	400.95	400.95	400.95
35	Stab	55	10.500	1.000	-8.000	292.21	292.21	292.21
36	Stab	56	10.500	1.000	-4.000	151.59	151.59	151.59
37	Stab	57	10.500	2.000	-8.000	182.83	182.83	182.83
38	Stab	58	10.500	2.000	-4.000	98.46	98.46	98.46
39	Stab	59	10.500	3.000	-8.000	292.21	292.21	292.21
40	Stab	60	10.500	3.000	-4.000	151.59	151.59	151.59
41	Stab	67	12.500	1.000	-8.000	292.21	292.21	292.21
42	Stab	68	12.500	1.000	-4.000	151.59	151.59	151.59
43	Stab	75	12.500	2.000	-8.000	182.83	182.83	182.83
44	Stab	76	12.500	2.000	-4.000	98.46	98.46	98.46
45	Stab	69	12.500	3.000	-8.000	292.21	292.21	292.21
46	Stab	70	12.500	3.000	-4.000	151.59	151.59	151.59
47	Stab	65	14.000	0.000	-8.000	423.09	423.09	423.09
48	Stab	66	14.000	0.000	-4.000	833.42	833.42	833.42
49	Stab	86	14.000	0.000	0.000	400.95	400.95	400.95
50	Stab	79	14.000	1.000	-8.000	214.55	214.55	214.55
51	Stab	80	14.000	1.000	-4.000	130.17	130.17	130.17

Eigenfrequenzen | Eigenformen knotenweise | Eigenformen stabweise | Eigenformen flächenweise | Eigenformen netzpunktweise | Massen in Netzknoten | Effektive Modalmassenfaktoren

**Bild 4.4:** Ergebnistabelle 5.6: Die Massen in die translatorischen Richtungen  $m_X$ ,  $m_Y$  und  $m_Z$ , die für jeden Netzknoten bestimmt wurden, sind aufgelistet.

5.7 Effektive Modalmassenfaktoren

ESF1 - Eigengewicht + Nutzlasten

Eigenform 83 (f: 104.549 Hz)

Form Nr.	Modale Masse $M_i$ [kg]	$m_{eX}$ [kg]	$m_{eY}$ [kg]	Effektive Modalmasse $m_{eZ}$ [kg]	$m_{\varphi X}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$m_{\varphi Y}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$m_{\varphi Z}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Effektiver Modalmassenfaktor $f_{meX}$ [-]	$f_{meY}$ [-]	$f_{meZ}$ [-]
79	2535.12	0.00	0.01	39.54	970.86	72.80	0.00	0.000	0.000	0.001
80	3264.83	0.01	0.01	23.10	484.81	54.07	0.04	0.000	0.000	0.001
81	677.30	0.00	0.00	250.24	24.11	18992.30	0.07	0.000	0.000	0.006
82	1110.96	0.00	0.00	0.00	3.47	0.38	0.82	0.000	0.000	0.000
83	2482.93	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
84	2315.12	0.03	0.00	93.63	0.34	1746.20	0.00	0.000	0.000	0.002
85	2512.59	0.00	0.00	0.01	0.00	7.58	0.00	0.000	0.000	0.000
86	2072.79	0.01	0.00	0.18	520.44	98.83	0.08	0.000	0.000	0.000
87	1667.03	0.04	0.00	0.09	52.50	710.26	0.00	0.000	0.000	0.000
88	1525.49	0.00	0.00	0.00	233.53	8.83	0.55	0.000	0.000	0.000
89	3831.36	0.00	0.02	0.01	67.60	0.02	0.67	0.000	0.000	0.000
90	2006.22	0.05	0.00	0.24	0.47	114.75	0.01	0.000	0.000	0.000
91	3152.21	0.00	0.00	164.93	0.02	2311.43	0.00	0.000	0.000	0.004
92	1448.57	0.00	0.00	53.92	0.12	1379.18	0.00	0.000	0.000	0.001
93	1930.08	0.01	0.01	4.73	607.84	606.79	0.05	0.000	0.000	0.000
94	1563.65	0.00	0.00	0.01	0.03	0.84	0.01	0.000	0.000	0.000

Eigenfrequenzen | Eigenformen knotenweise | Eigenformen stabweise | Eigenformen flächenweise | Eigenformen netzpunktweise | Massen in Netzknoten | Effektive Modalmassenfaktoren

**Bild 4.5:** Ergebnistabelle 5.7: Modalmassen  $M_i$ , effektive Modalmassen in die translatorischen Richtungen  $m_{eX}$ ,  $m_{eY}$  und  $m_{eZ}$  und um die globale Achsen  $m_{\varphi X}$ ,  $m_{\varphi Y}$  und  $m_{\varphi Z}$  sind aufgelistet. Es sind zudem die effektiven Modalmassenfaktoren  $f_{meX}$ ,  $f_{meY}$  und  $f_{meZ}$  angegeben.

Die effektiven Modalmassen  $m_{ij}^{\text{eff}}$  beschreiben die Massen, die in  $j$ -Richtung beschleunigt werden, wobei  $j = 1,2,3$  für Translationen und  $j = 4,5,6$  für Rotationen gilt, getrennt für jede Form  $i$ . Diese Massen sind unabhängig von der Skalierungsoption für Eigenformen und stehen in direktem Zusammenhang mit den Beteiligungsfaktoren  $\Gamma_{i,j}$ .

$$\Gamma_{i,j} = \frac{1}{M_i} \mathbf{u}_i^T \mathbf{M} \mathbf{T}_j \quad (4.4)$$

wobei  $\mathbf{T}_j$  die  $j^{\text{te}}$ -Spalte in Matrix  $\mathbf{T}$  ist,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (Z - Z_0) & -(Y - Y_0) \\ 0 & 1 & 0 & -(Z - Z_0) & 0 & (X - X_0) \\ 0 & 0 & 1 & (Y - Y_0) & -(X - X_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

mit  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  als globale Koordinaten des betrachteten FE-Knotens, dargestellt in Tabelle 5.6 (siehe Bild 4.4), und  $X_0$ ,  $Y_0$  und  $Z_0$  als Massenschwerpunkt, angegeben im Register **Massenfälle** → **Allgemein** in *RF-DYNAM Pro* (siehe Abschnitt 2.2). Diese Matrix  $\mathbf{T}$  gibt es für jeden FE-Knoten. Die Definition der Beteiligungsfaktoren, die auch die Rotationsfreiheitsgrade definieren, ist genauer in [12] in Abschnitt 15.7.5 beschrieben. Der Beteiligungsfaktor  $\Gamma_{i,j}$  ist dimensionslos für Translationen und hat die Einheit  $[m]$  für Verdrehungen.

Die effektiven Modalmassen werden definiert mit

$$m_{ij}^{\text{eff}} = M_i \cdot \Gamma_{ij}^2 \quad (4.6)$$

wobei die effektiven Massen für Verschiebungen  $m_{eX}$ ,  $m_{eY}$  und  $m_{eZ}$  in kg und für Verdrehungen  $m_{\varphi X}$ ,  $m_{\varphi Y}$  und  $m_{\varphi Z}$  in kgm<sup>2</sup> angegeben werden.



Die Summe der effektiven Modalmassen  $\sum m_e$  ist in Tabelle 5.7 (siehe Bild 4.5) angegeben. In translatorischen Richtungen sind diese Summen gleich der Gesamtmasse der Struktur  $M_{\text{total}}$  (siehe Tabelle 5.6 in Bild 4.4), ausgenommen sind Massen die nicht aktiviert werden, d.h. Massen in festen Lagern und angenommen. Dies trifft natürlich nur zu wenn alle Eigenwerte der Struktur berechnet werden.

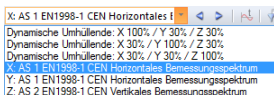
Die effektiven Modalmassenfaktoren  $f_{me}$  werden benötigt, um zu entscheiden, ob eine spezifische Form für das Antwortspektrenverfahren oder das Ersatzlastverfahren in Betracht gezogen werden muss. In **EN 1998-1** in **Abschnitt 4.3.3.3** ist festgelegt, dass „die Summe der effektiven Modalmassen der zu berücksichtigenden Modalbeiträge mindestens 90% der Gesamtmasse des Bauwerks“ erreicht und dass „alle Modalbeiträge berücksichtigt werden, deren effektive Modalmassen mehr als 5% der Gesamtmasse betragen“ [1]. Die effektiven Modalmassenfaktoren  $f_{me}$  werden definiert mit:

$$f_{me} = \frac{m_e}{\sum m_e} \quad (4.7)$$

Weitere Informationen zur Modalanalyse gibt es zum Beispiel in den Büchern von Meskouris *et al.* [13] und Tedesco *et al.* [9].

## 4.2 Dynamische Lastfälle - Antwortspektrenverfahren

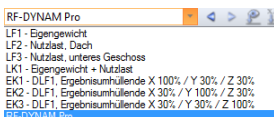
Die Ergebnistabellen, die zum *Antwortspektrenverfahren* gehören, sind verfügbar, wenn der entsprechende DLF-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt ist. Die Ergebnistabellen 5.11 bis 5.16 gehören zu dieser Art von *Dynamischen Lastfällen*. Das *Antwortspektrenverfahren* gehört zum Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*. Die erforderlichen Eingabedaten für ein Antwortspektrenverfahren wurden in den **Abschnitten 2.5** und **2.8.1** beschrieben.




Es ist möglich zwischen Ergebnissen aus den einzelnen Erregungsrichtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  und zwischen den kombinierten Ergebnissen (SRSS- oder 100% / 30%-Regel) mit dem Drop-Down-Menü hin- und herzuwechseln, das auf der linken Seite dargestellt ist. Die tabellierten Ergebnisse und auch die Grafik in der Arbeitsebene von RFEM aktualisieren sich entsprechend der getroffenen Auswahl.



Ein Antwortspektrenverfahren in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* führt nur zu Ergebniskombinationen. Hier werden die Modalantworten entsprechend der getroffenen Auswahl mit der SRSS- oder CQC-Regel kombiniert. Daher werden Minimal- und Maximalwerte in allen Ergebnistabellen angegeben.



Wenn der Export von Ergebniskombinationen wie in **Abschnitt 2.8.1** beschrieben ausgewählt wird, sind die EKs in der Drop-Down-Liste in der *Symbolleiste* in RFEM ersichtlich, wie links dargestellt ist. Die EKs können auch angezeigt werden über **Projekt-Navigator-Daten** → **Lastfälle und Kombinationen** → **Ergebniskombinationen** oder über den Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*, der über die Schaltfläche  aufgerufen werden kann.

### Tabelle 5.11 und 5.12: Lagerkräfte

Die Knotenlagerkräfte werden in Tabelle 5.11 angezeigt, dargestellt in Bild 4.6. In ähnlicher Weise werden die Linienlagerkräfte in Tabelle 5.12 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte angegeben.

5.11 Knotenlagerkräfte

DLF1 - Antwortspektrenverfahren

X: AS 1 EN1998-1 CEN Horizontales I

Knoten Nr.		Lagerkräfte			Lagemomente		
		$P_x$ [N]	$P_y$ [N]	$P_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
3	max	2.536	1.297	39.941	0.000	0.000	0.000
	min	-2.536	-1.297	-39.941	0.000	0.000	0.000
6	max	2.585	1.244	41.866	0.000	0.000	0.001
	min	-2.585	-1.244	-41.866	0.000	0.000	-0.001
9	max	412.073	1.645	524.622	0.000	0.000	0.001
	min	-412.073	-1.645	-524.622	0.000	0.000	-0.001
20	max	419.025	1.592	540.793	0.000	0.000	0.001
	min	-419.025	-1.592	-540.793	0.000	0.000	-0.001
23	max	0.171	0.123	545.470	0.000	0.000	0.024
	min	-0.171	-0.123	-545.470	0.000	0.000	-0.024
34	max	0.177	0.135	557.971	0.000	0.000	0.023
	min	-0.177	-0.135	-557.971	0.000	0.000	-0.023
60	max	0.172	0.083	1.448	0.000	0.000	0.020
	min	-0.172	-0.083	-1.448	0.000	0.000	-0.020

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen

**Bild 4.6:** Ergebnistabelle 5.11: Maximale und minimale Knotenlagerkräfte und -momente in die drei Richtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  werden angegeben.

## Tabelle 5.13: Knotenverformungen

Die Knotenverformungen werden in Tabelle 5.13, wie in Bild 4.7 dargestellt, angegeben. Es werden Maximal- und Minimalwerte angegeben.

5.13 Knotenverformungen

DLF1 - Antwortspektrenverfahren

Dynamische Umhüllende: X 100%

Knoten Nr.		Verschiebungen			Verdrehungen		
		$u_x$ [mm]	$u_y$ [mm]	$u_z$ [mm]	$\varphi_x$ [mrad]	$\varphi_y$ [mrad]	$\varphi_z$ [mrad]
24	min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	max	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
25	min	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	max	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
26	min	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	max	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
27	min	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	max	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
28	min	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	max	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
29	min	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	max	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen

**Bild 4.7:** Ergebnistabelle 5.13: Maximale und minimale Knotenverschiebungen  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  und Verdrehungen  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  und  $\varphi_z$  werden angegeben.

## Tabelle 5.14: Stabschnittgrößen

Die Stabschnittgrößen werden in Tabelle 5.14 angezeigt, wie in Bild 4.8 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte angegeben.

5.14 Stabschnittgrößen

DLF1 - Antwortspektrenverfahren

Dynamische Umhüllende: X 100%

Stab Nr.	A Im Punkt von	B Normalkraft N [N]	C Querkraft		D V <sub>y</sub> [N]	E V <sub>z</sub> [N]	F Momente			G M <sub>x</sub> [Nm]	M <sub>y</sub> [Nm]	M <sub>z</sub> [Nm]
			M <sub>x</sub> [Nm]	M <sub>y</sub> [Nm]			M <sub>z</sub> [Nm]					
1	min N	-1959.357	-142.495	-1427.875	-0.490	-2288.666	-316.900					
	max N	1959.357	142.495	1427.875	0.490	2288.666	316.900					
	min V <sub>y</sub>	-1959.357	-142.495	-1427.875	-0.490	-2288.666	-316.900					
	max V <sub>y</sub>	1959.357	142.495	1427.875	0.490	2288.666	316.900					
	min V <sub>z</sub>	-1959.357	-142.495	-1427.875	-0.490	-2288.666	-316.900					
	max V <sub>z</sub>	1959.357	142.495	1427.875	0.490	2288.666	316.900					
	min M <sub>x</sub>	-1959.357	-142.495	-1427.875	-0.490	-2288.666	-316.900					
	max M <sub>x</sub>	1959.357	142.495	1427.875	0.490	2288.666	316.900					
	min M <sub>y</sub>	-1959.357	-142.495	-1427.875	-0.490	-3441.428	-257.176					
	max M <sub>y</sub>	1959.357	142.495	1427.875	0.490	3441.428	257.176					
	min M <sub>z</sub>	-1959.357	-142.495	-1427.875	-0.490	-2288.666	-316.900					
	max M <sub>z</sub>	1959.357	142.495	1427.875	0.490	2288.666	316.900					
2	min N	-7254.878	-46.910	-2544.681	-0.516	0.000	0.000					
	max N	7254.878	46.910	2544.681	0.516	0.000	0.000					
	min V <sub>y</sub>	-7254.878	-46.910	-2544.681	-0.516	0.000	0.000					
	max V <sub>y</sub>	7254.878	46.910	2544.681	0.516	0.000	0.000					
	min V <sub>z</sub>	-7254.878	-46.910	-2544.681	-0.516	0.000	0.000					
	max V <sub>z</sub>	7254.878	46.910	2544.681	0.516	0.000	0.000					
	min M <sub>x</sub>	-7254.878	-46.910	-2544.681	-0.516	0.000	0.000					
	max M <sub>x</sub>	7254.878	46.910	2544.681	0.516	0.000	0.000					

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen

**Bild 4.8:** Ergebnistabelle 5.14: Maximale und minimale Normalkräfte  $N$ , Querkräfte  $V_y$  und  $V_z$  sowie Momente  $M_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  werden angegeben.

## Tabelle 5.15 und 5.16: Flächenergebnisse

Tabelle 5.15 enthält die Flächenschnittgrößen wie in Bild 4.9 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte zusammen mit Punktkoordinaten angegeben, bei denen der Maximal- oder Minimalwert der spezifischen Schnittgröße auftritt.

5.15 Flächenschnittgrößen

DLFI - Antwortspektrenverfahren

Dynamische Umhüllende: X 100%

Fläche Nr.	Im Punkt von	Knoten Koordinate	X [m]	Y [m]	Z [m]	Momente	Querkraft	Normalkraft	
						$m_x$ [Nm/m]	$m_y$ [Nm/m]	$m_{xy}$ [Nm/m]	$v_x$ [Nm]
	max $n_{xy}$		2.000	-4.000	4.000	182.574	11.981	20.212	346.568
	min $n_{xy}$		0.000	0.000	0.000	427.959	1872.318	1226.141	5616.292
	max $n_{xy}$		2.000	-4.000	2.000	159.483	171.604	36.591	73.188
2	min $m_x$		0.000	-8.000	0.500	<b>207.452</b>	194.807	131.250	239.881
	max $m_x$		1.500	-4.000	2.500	<b>4.501</b>	108.480	232.941	142.051
	min $m_y$		1.000	-4.000	2.000	<b>396.065</b>	130.647	239.741	1647.957
	max $m_y$		4.000	-8.000	4.000	182.574	<b>11.981</b>	20.212	346.568
	min $m_{xy}$		0.000	-8.000	0.000	70.463	54.651	<b>248.136</b>	2762.697
	max $m_{xy}$		2.000	-4.000	3.500	175.163	183.797	<b>2.558</b>	24.102
	min $v_x$		0.000	-8.000	0.000	70.463	54.651	248.136	<b>2762.697</b>
	max $v_x$		0.500	-4.000	2.500	202.513	276.349	14.556	<b>17.736</b>
	min $v_y$		5.000	-4.000	3.000	110.062	248.749	46.589	207.554
	max $v_y$		2.000	-4.000	3.500	175.163	183.797	2.558	<b>38.121</b>
	min $n_x$		0.000	-8.000	0.000	70.463	54.651	248.136	2762.697
	max $n_x$		1.500	-4.000	2.500	4.501	108.480	232.941	142.051
	min $n_y$		5.000	-4.000	3.000	110.062	248.749	46.589	207.554
	max $n_y$		4.000	-8.000	4.000	182.574	11.981	20.212	346.568
	min $n_{xy}$		0.000	-8.000	0.500	207.452	194.807	131.250	239.881
	max $n_{xy}$		2.000	-4.000	1.500	159.483	171.604	36.591	73.188

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen

**Bild 4.9:** Ergebnistabelle 5.15: Maximale und minimale Normalkräfte  $n_x$ ,  $n_y$  und  $n_z$ , Querkraft  $v_x$  und  $v_y$  sowie Momente  $m_x$ ,  $m_y$  und  $m_{xy}$  werden angegeben.

Flächenspannungen werden in Tabelle 5.16 aufgelistet, dargestellt in Bild 4.10.

5.16 Flächenspannungen

DLFI - Antwortspektrenverfahren

Dynamische Umhüllende: X 100%

Fläche Nr.	Im Punkt von	Knoten Koordinate	X [m]	Y [m]	Z [m]	Momente	Querkraft	Normalkraft	
						$m_x$ [Nm/m]	$m_y$ [Nm/m]	$m_{xy}$ [Nm/m]	$v_x$ [Nm]
	max $n_{xy}$		2.000	-4.000	4.000	182.574	11.981	20.212	346.568
	min $n_{xy}$		0.000	0.000	0.000	427.959	1872.318	1226.141	5616.292
	max $n_{xy}$		2.000	-4.000	2.000	159.483	171.604	36.591	73.188
2	min $m_x$		0.000	-8.000	0.500	<b>207.452</b>	194.807	131.250	239.881
	max $m_x$		1.500	-4.000	2.500	<b>4.501</b>	108.480	232.941	142.051
	min $m_y$		1.000	-4.000	2.000	<b>396.065</b>	130.647	239.741	1647.957
	max $m_y$		4.000	-8.000	4.000	182.574	<b>11.981</b>	20.212	346.568
	min $m_{xy}$		0.000	-8.000	0.000	70.463	54.651	<b>248.136</b>	2762.697
	max $m_{xy}$		2.000	-4.000	3.500	175.163	183.797	<b>2.558</b>	24.102
	min $v_x$		0.000	-8.000	0.000	70.463	54.651	248.136	<b>2762.697</b>
	max $v_x$		0.500	-4.000	2.500	202.513	276.349	14.556	<b>17.736</b>
	min $v_y$		5.000	-4.000	3.000	110.062	248.749	46.589	207.554
	max $v_y$		2.000	-4.000	3.500	175.163	183.797	2.558	<b>38.121</b>
	min $n_x$		0.000	-8.000	0.000	70.463	54.651	248.136	2762.697
	max $n_x$		1.500	-4.000	2.500	4.501	108.480	232.941	142.051
	min $n_y$		5.000	-4.000	3.000	110.062	248.749	46.589	207.554
	max $n_y$		4.000	-8.000	4.000	182.574	11.981	20.212	346.568
	min $n_{xy}$		0.000	-8.000	0.500	207.452	194.807	131.250	239.881
	max $n_{xy}$		2.000	-4.000	1.500	159.483	171.604	36.591	73.188

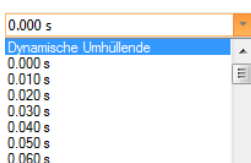
Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen

**Bild 4.10:** Ergebnistabelle 5.16: Es werden maximale und minimale Normal- und Schubspannungen angegeben.

## 4.3 Dynamische Lastfälle - Zeitverlaufsverfahren

Die Ergebnistabellen, die zum *Zeitverlaufsverfahren* gehören, werden angezeigt, wenn der entsprechende DLF-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt ist. Die Ergebnistabellen 5.17 bis 5.24 gehören zu dieser Art von *Dynamischen Lastfällen*. Das *Zeitverlaufsverfahren* gehört zum Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*. Die erforderlichen Eingabedaten für ein Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen wurden in den Abschnitten 2.6 und 2.8.2 erläutert und für ein Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen in den Abschnitten 2.7 und 2.8.3.

Ergebnisse sind getrennt für jeden Zeitschritt verfügbar. Es ist auch ein umhüllendes Ergebnis verfügbar, das die maximalen und minimalen Ergebnisse aller Zeitschritte anzeigt. Es ist möglich zwischen den Ergebnissen unter Verwendung des Drop-Down-Menüs hin- und herzuwechseln. Die tabellierten Ergebnisse und auch die Grafik in der Arbeitsebene von RFEM aktualisieren sich entsprechend der getroffenen Auswahl. Die Ergebnisse können auch als Funktion der Zeit im *Zeitverlaufsdiagramm* angezeigt werden, der über die Schaltfläche aufgerufen werden kann.



RF-DYNAM Pro  
 LF1 - Eigengewicht  
 LF2 - Nutzlast, Dach  
 LF3 - Nutzlast, unteres Geschoss  
 LF30 - DLF3 - t: 0.0000 s  
 LF31 - DLF3 - t: 0.5000 s  
 LF32 - DLF3 - t: 1.0000 s  
 EK30 - DLF3, Ergebnismhüllende

Wenn der Export von Lastfällen und / oder Ergebniskombinationen wie in den [Abschnitten 2.8.2](#) und [2.8.3](#) beschrieben, ausgewählt wird, sind die *LKs* und die *EKs* in der Drop-Down-Liste in der *Symbolleiste* in RFEM ersichtlich, wie links dargestellt. Die *LKs* können auch angezeigt werden über **Projekt-Navigator-Daten** → **Lastfälle und Kombinationen** → **Lastfälle** oder gleichermaßen für *EKs* über **Ergebniskombinationen**. Lastfälle und Ergebniskombinationen können auch über den Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* aufgerufen werden.

## Tabelle 5.17 und 5.18: Lagerkräfte

Die Knotenlagerkräfte werden in Tabelle 5.17 angezeigt, dargestellt in [Bild 4.11](#). In ähnlicher Weise werden die Lagerkräfte in Tabelle 5.18 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte im Fall einer *Dynamischen Umhüllenden* angegeben, aber nur ein Wert pro Knoten im Fall von spezifischen Zeitschritten.

5.17 Knotenlagerkräfte

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.020 s

Knoten Nr.	Lagerkräfte			Lagermomente		
	P <sub>x</sub> [N]	P <sub>y</sub> [N]	P <sub>z</sub> [N]	M <sub>x</sub> [Nm/m]	M <sub>y</sub> [Nm/m]	M <sub>z</sub> [Nm/m]
3	6.173	13.387	-1090.500	0.000	0.000	-0.004
6	6.174	-13.458	-1096.200	0.000	0.000	0.004
9	9.952	15.096	-1193.000	0.000	0.000	0.003
20	11.804	-15.128	-1202.400	0.000	0.000	-0.003
23	-0.146	9.845	-577.300	0.000	0.000	0.000
34	-0.146	-10.552	-600.840	0.000	0.000	0.000
49	-0.126	6.458	-388.500	0.000	0.000	0.000
60	-0.126	-7.517	-429.920	0.000	0.000	0.000

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.11:** Ergebnistabelle 5.17: Knotenlagerkräfte und Lagermomente in die drei Richtungen *X*, *Y* und *Z* werden angegeben.

## Tabelle 5.19: Knotenverformungen

Die Knotenverformungen werden in Tabelle 5.19, wie in [Bild 4.12](#) dargestellt, angegeben. Es werden Maximal- und Minimalwerte im Fall einer *Dynamischen Umhüllenden* angegeben, aber nur ein Wert pro Knoten im Fall von spezifischen Zeitschritten.

5.19 Knotenverformungen

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.2000 s

Knoten Nr.	Verschiebungen			Verdrehungen		
	u <sub>x</sub> [mm]	u <sub>y</sub> [mm]	u <sub>z</sub> [mm]	φ <sub>x</sub> [mrad]	φ <sub>y</sub> [mrad]	φ <sub>z</sub> [mrad]
1	-0.116	-0.097	0.253	0.664	-0.749	0.050
2	0.025	-0.018	0.147	0.108	-0.179	0.031
3	0.000	0.000	0.000	-0.058	0.079	0.000
4	-0.097	0.113	0.253	-0.663	-0.750	-0.058
5	0.034	0.026	0.147	-0.108	-0.179	-0.035
6	0.000	0.000	0.000	0.060	0.076	0.000
7	0.156	-0.185	0.443	1.243	0.676	0.004
8	0.082	-0.025	0.246	0.074	0.157	-0.052
9	0.000	0.000	0.000	-0.044	-0.108	0.000
10	0.107	-0.165	1.853	1.175	0.477	0.055
11	0.103	-0.028	0.415	0.165	0.234	0.000
12	0.069	-0.069	2.760	0.454	0.304	0.017
13	0.104	-0.014	0.555	0.071	0.236	-0.001
14	0.073	0.055	2.760	-0.454	0.304	-0.024

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.12:** Ergebnistabelle 5.19: Knotenverschiebungen *u<sub>x</sub>*, *u<sub>y</sub>*, *u<sub>z</sub>* und Verdrehungen *φ<sub>x</sub>*, *φ<sub>y</sub>* und *φ<sub>z</sub>* werden angegeben.



## Tabelle 5.20: Stabschnittgrößen

Die Stabschnittgrößen werden in Tabelle 5.20 angezeigt, wie in Bild 4.13 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte im Fall einer *Dynamischen Umhüllenden* angegeben, aber nur ein Wert pro Knoten im Fall von spezifischen Zeitschritten.

5.20 Stabschnittgrößen

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.020 s

Stab Nr.	Knoten	B X [m]	C Normalkraft N [N]	D Querkraft V <sub>y</sub> [N]	E V <sub>z</sub> [N]	F M <sub>x</sub> [Nm]	G M <sub>y</sub> [Nm]	H M <sub>z</sub> [Nm]
		3.000	-499.690	-23.279	48.724	0.002	49.024	23.120
		3.333	-499.690	-23.279	48.724	0.002	65.265	30.879
		3.667	-499.690	-23.279	48.724	0.002	81.507	38.639
	1	4.000	-499.690	-23.279	48.724	0.002	97.748	46.398
2	3	0.000	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	0.000	0.000
		0.333	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	4.462	2.058
		0.667	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	8.925	4.115
		1.000	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	13.387	6.173
		1.333	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	17.849	8.231
		1.667	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	22.312	10.289
		2.000	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	26.774	12.346
		2.333	-1090.500	-6.173	13.387	-0.004	31.236	14.404

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.13:** Ergebnistabelle 5.20: Normalkräfte  $N$ , Querkräfte  $V_y$  und  $V_z$  sowie Momente  $M_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  werden angegeben.

## Tabelle 5.21 und 5.22: Flächenergebnisse

Tabelle 5.21 gibt die Flächenschnittgrößen an. Dies ist in Bild 4.14 dargestellt.

5.21 Flächenschnittgrößen

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.2000 s

Fläche Nr.	FE-Netz Punkt	B X [m]	C Knotenordinate Y [m]	D Z [m]	E m <sub>x</sub> [Nm/m]	F m <sub>y</sub> [Nm/m]	G m <sub>xy</sub> [Nm/m]	H v <sub>x</sub> [Nm]	I v <sub>y</sub> [Nm]	J n <sub>x</sub> [Nm]	K n <sub>y</sub> [Nm]	L n <sub>xy</sub> [Nm]
1	1	0.000	0.000	0.000	-3518.500	-4377.700	-2937.300	18610.000	27322.000	18550.000	30033.000	400.480
	4	0.000	0.000	0.000	-59.253	169.830	-951.000	-2201.500	21311.000	1004.900	5790.700	-14311.000
	7	5.000	0.000	4.000	1320.700	522.700	-117.810	-1389.800	1371.600	-618.160	-2920.600	-5632.400
	10	0.000	0.000	4.000	1584.900	25.669	-162.980	4437.600	1288.700	-4275.600	-628.410	-4194.400
	12	1.000	-4.000	4.000	1320.700	522.700	-117.810	-1389.800	1371.600	-618.160	-2920.600	-5632.400
	14	2.000	-4.000	4.000	1695.200	73.084	-62.468	-204.560	1308.000	-4914.700	-589.410	-183.410
	16	3.000	-4.000	4.000	1676.200	667.700	-75.126	-675.350	1197.200	-2528.500	-2764.700	-2869.800
	18	4.000	-4.000	4.000	1555.700	60.258	25.988	-4868.800	1306.800	-3469.000	-547.740	3848.800
	61	5.000	0.000	3.000	720.880	401.730	-139.090	1926.600	-6261.400	447.320	-5611.200	9991.101
	62	3.000	-8.000	3.500	230.940	-103.660	554.890	1912.600	25936.000	2568.300	6488.900	16354.000
	63	3.000	-8.000	2.500	13.452	1164.700	577.070	-1203.800	19130.000	-227.350	-13682.000	17144.000
	64	0.000	-8.000	0.500	751.360	1029.000	-130.680	-1410.600	-4326.800	-1780.300	-8072.800	6727.300
	65	3.500	-8.000	0.000	42.197	939.750	-778.950	1625.600	15789.000	-64.853	-10195.000	-14680.000
	66	3.500	-8.000	1.000	789.250	901.510	-77.500	1554.000	-3461.800	-1625.200	-6145.500	-6519.700
	67	3.500	-8.000	1.500	822.360	1334.700	7.694	1512.600	-2423.200	-2807.800	-10730.000	-5124.200
	68	3.500	-8.000	2.000	-45.647	1260.000	-356.280	1741.100	10656.000	-1000.100	-18844.000	-10392.000

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.14:** Ergebnistabelle 5.21: Maximale und minimale Normalkräfte  $n_x$ ,  $n_y$  und  $n_z$ , Querkräfte  $v_x$  und  $v_y$  sowie Momente  $m_x$ ,  $m_y$  und  $m_{xy}$  werden angegeben.

Flächenspannungen werden in Tabelle 5.22 aufgelistet, dargestellt in Bild 4.15.

5.22 Flächengrundspannungen

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.020 s

Fläche Nr.	FE-Netz Punkt	B X [m]	C Knotenordinate Y [m]	D Z [m]	E σ <sub>xx</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	F σ <sub>yy</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	G σ <sub>xy</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	H σ <sub>xz</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	I σ <sub>yz</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	J σ <sub>xy</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	K τ <sub>xz</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	L τ <sub>yz</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]
1	1	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01
	4	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	5.000	0.000	4.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.000	0.000	4.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12	1.000	-4.000	4.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	14	2.000	-4.000	4.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16	3.000	-4.000	4.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	18	4.000	-4.000	4.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	61	5.000	0.000	3.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	62	3.000	-8.000	3.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	63	3.000	-8.000	2.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64	0.000	-8.000	0.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	65	3.500	-8.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	66	3.500	-8.000	1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	67	3.500	-8.000	1.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	68	3.500	-8.000	2.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.15:** Ergebnistabelle 5.22: Normal- und Schubspannungen sind angegeben.

## Tabelle 5.23 und 5.24: Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten

Zusätzlich zu den Standardergebnissen werden Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten in Tabelle 5.23, in Bild 4.16 dargestellt, und in Tabelle 5.24, dargestellt in Bild 4.17 angegeben. Diese Ergebnisse sind für jeden Zeitschritt verfügbar und auch die dynamisch Umhüllende kann angezeigt werden.

5.23 Knotenbeschleunigungen

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.020 s

Knoten Nr.	Beschleunigungen			Winkelbeschleunigungen		
	$u''_x$ [m/s <sup>2</sup> ]	$u''_y$ [m/s <sup>2</sup> ]	$u''_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\varphi''_x$ [rad/s <sup>2</sup> ]	$\varphi''_y$ [rad/s <sup>2</sup> ]	$\varphi''_z$ [rad/s <sup>2</sup> ]
1	-0.02	-0.01	0.01	0.06	-0.07	0.01
2	-0.01	-0.01	0.01	0.05	-0.06	0.01
3	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.04	0.00
4	-0.02	0.01	0.01	-0.08	-0.07	0.00
5	-0.02	0.01	0.01	-0.05	-0.06	-0.01
6	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00
7	0.01	-0.01	0.02	0.08	0.07	0.00
8	0.01	-0.01	0.01	0.07	0.06	-0.01
9	0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.04	0.00
10	0.01	-0.01	0.11	0.08	0.07	0.00
11	0.01	-0.01	0.10	0.09	0.09	0.00
12	0.01	0.00	0.18	0.03	0.07	0.00
13	0.01	0.00	0.17	0.04	0.10	0.00
14	0.01	0.00	0.18	-0.03	0.07	0.00
15	0.01	0.01	0.17	-0.04	0.10	0.00
16	0.01	0.01	0.11	-0.08	0.07	0.00

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.16:** Ergebnistabelle 5.23: Knotenbeschleunigung  $\ddot{u}_X, \ddot{u}_Y, \ddot{u}_Z$  und Verdrehungen  $\ddot{\varphi}_X, \ddot{\varphi}_Y$  und  $\ddot{\varphi}_Z$  werden angegeben.

5.24 Knotengeschwindigkeiten

DLF3 - Zeitverlaufsverfahren - Zeit 0.020 s

Knoten Nr.	Geschwindigkeiten			Winkelgeschwindigkeiten		
	$\dot{u}_x$ [m/s]	$\dot{u}_y$ [m/s]	$\dot{u}_z$ [m/s]	$\dot{\varphi}_x$ [rad/s]	$\dot{\varphi}_y$ [rad/s]	$\dot{\varphi}_z$ [rad/s]
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Knotenlagerkräfte | Knotenverformungen | Stabschnittgrößen | Flächenschnittgrößen | Flächengrundspannungen | Knotenbeschleunigungen | Knotengeschwindigkeiten

**Bild 4.17:** Ergebnistabelle 5.24: Knotengeschwindigkeiten  $\dot{u}_X, \dot{u}_Y, \dot{u}_Z$  und Verdrehungen  $\dot{\varphi}_X, \dot{\varphi}_Y$  und  $\dot{\varphi}_Z$  werden angegeben.



Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten sind nicht in den Lastfällen oder Ergebniskombinationen enthalten, die in das Hauptprogramm RFEM exportiert werden.

## Zeitverlaufsdiagramm

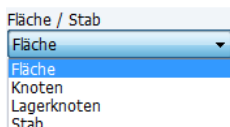
Alle Ergebnisse, die in den oben genannten Tabellen dargestellt werden, können als Funktion der Zeit mit dem *Zeitverlaufsdiagramm* angezeigt werden. Das ist das wichtigste Werkzeug für die Ergebnisauswertung eines Zeitverlaufsverfahrens.



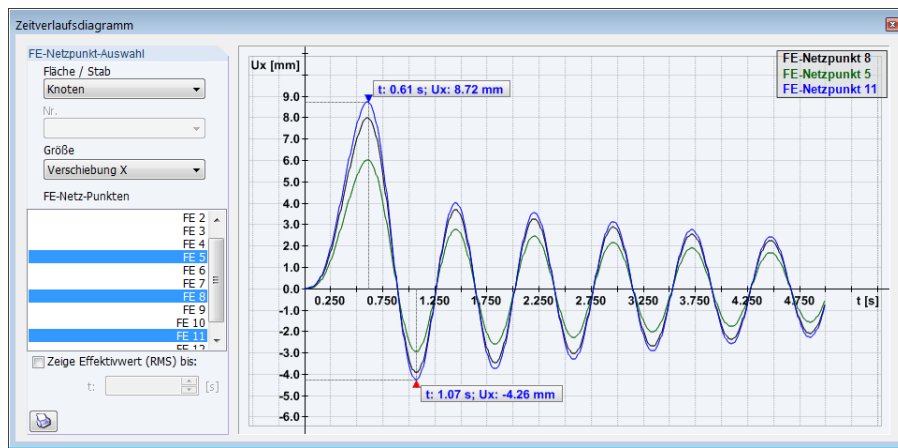
Diese Grafik kann über die Schaltfläche [Zeitverlaufsmonitor] angezeigt werden. Die Schaltfläche befindet sich im Tabellenbereich und im Panel im Register *Anzeigefaktoren*.

Das *Zeitverlaufsdiagramm* ist in Bild 4.18 dargestellt.

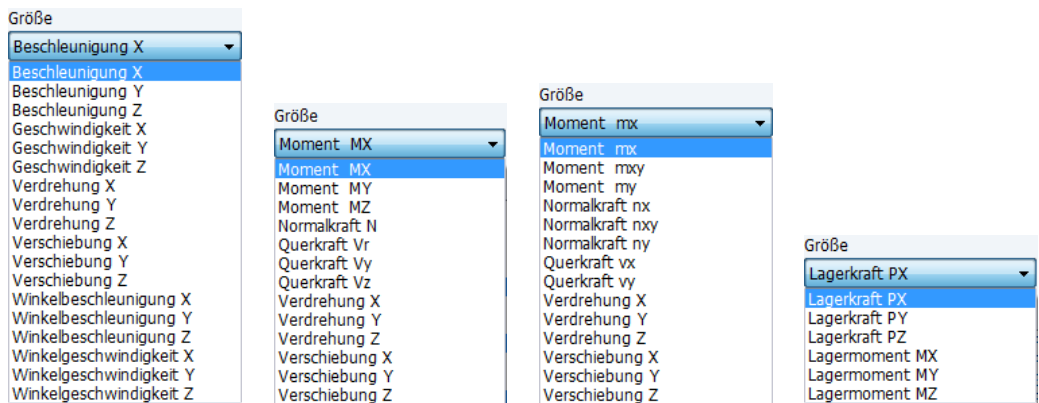
Es ist möglich zwischen Knoten, Stäben, Flächen und Lagerknoten im Drop-Down-Menü, links dargestellt, auszuwählen. Abhängig von der getroffenen Auswahl sind verschiedene Ergebnisse verfügbar, wie in den Bildern 4.19a, 4.19b, 4.19c und 4.19d dargestellt.





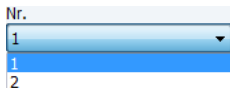


**Bild 4.18:** Zeitverlaufsmonitor zum Anzeigen von Ergebnissen als Funktion der Zeit. Hier wird die Verschiebung  $u_X$  von drei Knoten dargestellt. Es werden die Maximal- und Minimalwerte angegeben.



- a) Ergebnisse an Knoten      b) Ergebnisse an Stäben      c) Ergebnisse an Flächen      d) Ergebnisse an Lagern

**Bild 4.19:** Vorhandene Ergebnisse für (a) Knoten, (b) Stäbe, (c) Flächen und (d) Ergebnisse an Lagern.



Im Fall von Stäben und Flächen ist die Stab- oder Flächennummer aus der Drop-Down-Liste auszuwählen.

Je nach der oben getroffenen Auswahl ist entweder eine Liste an FE-Netzpunkten (siehe [Bild 4.18](#)) oder eine Liste mit Abständen an Stäben (siehe [Bild 4.20](#)) verfügbar. Eine Mehrfachauswahl der angezeigten Punkte oder Positionen ist mit gedrückter [Strg]-Taste möglich.

Die Legende in der Grafik wird automatisch gesetzt und auch die Achsenbeschriftungen und -skalierungen werden je nach getroffener Auswahl angepasst. Minimal- und Maximalwerte werden zusammen mit den entsprechenden Zeitschritten angegeben. Mithilfe des Mauseis ist es möglich die Grafik zu vergrößern. Werte werden an der Spitze des Mauszeigers angezeigt, wenn man die Maus entlang des Kurvenbildes bewegt.

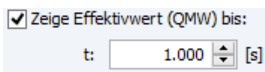


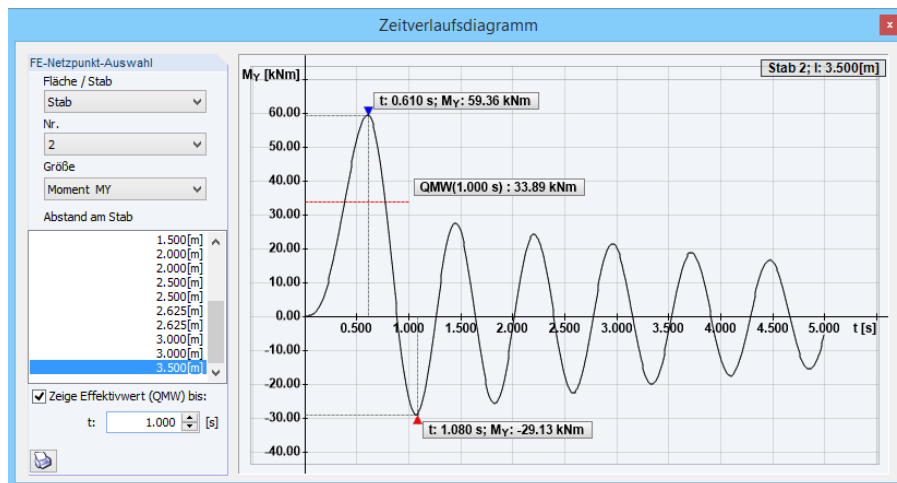
Die Arbeitsebene von RFEM, die Tabellen und der *Zeitverlaufsmonitor* stehen in Interaktion. Wenn eine Reihe mit einem bestimmten Stab in der Tabelle ausgewählt wird oder wenn ein Knoten in der Grafik markiert wird, werden beispielsweise die Einstellungen im *Zeitverlaufsmonitor* angepasst. Es muss nur das Ergebnis ausgewählt werden, das angezeigt werden soll ([Bilder 4.19a - 4.19d](#)).

Der *Quadratische Mittelwert* (QMW) beliebiger Ergebnisse bis zu einer gewissen Zeit kann optional angezeigt werden, wenn das Kontrollfeld, dargestellt auf der linken Seite, ausgewählt und eine Zeit angegeben ist. Der QMW berechnet sich wie folgt:

$$E_{QMW} = \sqrt{\frac{1}{n}(E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2)} \quad (4.8)$$

$E_n$  sind die Ergebnisse von jedem Zeitschritt mit  $n$ -betrachteten Zeitschritten. Der QMW wird im *Zeitverlaufsdiagramm* angezeigt. Dies ist in [Bild 4.20](#) dargestellt.





**Bild 4.20:** Zeitverlaufsdiagramm mit dem *Quadratischen Mittelwert* (QMW). Hier ist das Moment  $M_Y$  als Funktion der Zeit dargestellt, der QMW ist bis 1.0 sec angegeben.



Der *Quadratische Mittelwert* ist nur verfügbar, wenn eine einzelne Kurve dargestellt wird. Wenn Ergebnisse mehrerer Knoten überlagert werden, ist das Kontrollfeld QMW nicht verfügbar.



Mit der Schaltfläche [Drucken] kann das *Zeitverlaufsdiagramm* direkt in das Ausdruckprotokoll gedruckt werden. In der Maske, die sich öffnet, kann eine Überschrift für diese Grafik festgelegt werden, die im Protokoll verwendet werden soll.

Zahlwerte

Als Grafik speichern

Einstellungen

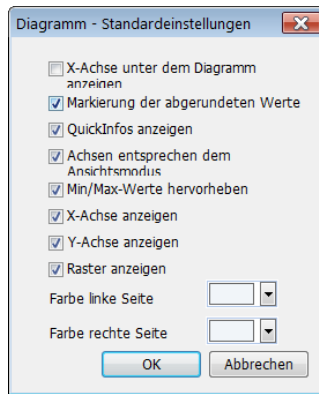
Mit einem Rechtsklick auf das *Zeitverlaufsdiagramm* stehen drei Optionen zur Auswahl: (1) Auf die Diagrammdaten kann tabellarisch zugegriffen werden. Die Zeitschritte sind zusammen mit allen Ergebnissen, die in der Grafik dargestellt werden, aufgeführt. Ein Beispiel ist in [Bild 4.21](#) angegeben, die Werte in tabellarischer Form können in *Excel* über die Schaltfläche exportiert werden. (2) Das *Zeitverlaufsdiagramm* kann als Bild gespeichert werden und (3) die Einstellungen der Kurve können aufgerufen werden. Der Einstellungsdialog des *Zeitverlaufsdiagramms* ist in [Bild 4.22](#) dargestellt.

Diagrammdaten anzeigen

t [s]	$M_Y$ [kNm]
0.000	0.00
0.001	0.00
0.002	0.00
0.003	0.00
0.004	0.00
0.005	0.00
0.006	0.00
0.007	0.00
0.008	0.00
0.009	0.00
0.010	0.00
0.011	0.00
0.012	0.00
0.013	0.00
0.014	0.01
0.015	0.01
0.016	0.01

OK Abbrechen

**Bild 4.21:** Numerische Werte der graphischen Darstellung im *Zeitverlaufsdiagramm*.



**Bild 4.22:** Einstellungen des Zeitverlaufsdiagramm.

## 4.4 Dynamische Lastfälle - Ersatzlastverfahren

Die Ergebnistabellen, die zum *Ersatzlastverfahren* gehören, werden angezeigt, wenn der entsprechende *DLF*-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt ist. Die Ergebnistabellen 5.8 bis 5.10 gehören zu dieser Art von *Dynamischen Lastfällen*. Das *Ersatzlastverfahren* gehört zum Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*. Die erforderlichen Eingabedaten für ein Ersatzlastverfahren wurden in den [Abschnitten 2.5](#) und [2.8.4](#) beschrieben.

Es ist möglich zwischen Tabellen, die die Ersatzlasten für alle Eigenwerte des Systems oder getrennt für jede Form zeigen, hin- und herzuwechseln.

### Ersatzlasten

Wenn ein Ersatzlastverfahren durchgeführt wird, werden nur die Ersatzlasten in *RF-DYNAM Pro* berechnet, die restliche Berechnung erfolgt dann im Hauptprogramm RFEM.

Die Ersatzlasten  $F_X$ ,  $F_Y$  und  $F_Z$  werden separat für jede Erregungsrichtung der Antwortspektren und separat für jede Eigenform des Systems folgendermaßen berechnet:

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{Bmatrix} = \Gamma_X \cdot \begin{Bmatrix} u_X \\ u_Y \\ u_Z \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{S}_{a,X}(T) \cdot \begin{Bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

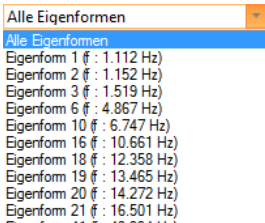
$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{Bmatrix} = \Gamma_Y \cdot \begin{Bmatrix} u_X \\ u_Y \\ u_Z \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{S}_{a,Y}(T) \cdot \begin{Bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{Bmatrix} = \Gamma_Z \cdot \begin{Bmatrix} u_X \\ u_Y \\ u_Z \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{S}_{a,Z}(T) \cdot \begin{Bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

mit

- $\Gamma$  Beteiligungsfaktoren in  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ -Richtung wie in [Gleichung 4.4](#) definiert, unter Verwendung einer modalen Masse von  $M_i = 1 \text{ kg}$ .
- $u$  Verschiebungswerte in  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ -Richtung der skalierten Eigenform, sodass  $M_i = \mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{u}_i = 1 \text{ kg}$
- $\mathbf{S}_a(T)$  Beschleunigung aus dem Antwortspektrum unter Verwendung der Eigenperiode  $T$  des betrachteten Eigenwertes
- $M$  Masse in die Richtung  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  am betrachteten FE-Knoten

Mit den Formeln, die in der [Gleichung 4.9](#) angegeben sind, werden die Ersatzlasten aus einem Antwortspektrum in  $X$ -Richtung, in der [Gleichung 4.10](#) die Lasten aus einem Antwortspektrum in  $Y$ -Richtung und in der [Gleichung 4.11](#) die Lasten aus einem Antwortspektrum in  $Z$ -Richtung berechnet.



Diese statischen Ersatzlasten gibt es an jedem FE-Knoten innerhalb der Struktur, solange die Masse  $M$  und die Eigenform  $u$  an diesem Punkt nicht 0 betragen.

Die Ergebnistabellen für das Ersatzlastverfahren werden in die drei Erregungsrichtungen aufgeteilt: In Tabelle 5.8 sind die resultierenden Ersatzlasten für Antwortspektren aufgeführt, die in  $X$ -Richtung wirken, in Tabelle 5.9 befinden sich jene für Antwortspektren in  $Y$ -Richtung und in Tabelle 5.10 jene für Antwortspektren in  $Z$ -Richtung. Die Tabelle 5.9 ist in [Bild 4.23](#) dargestellt.

5.9 Ersatzlasten (Erregungen in Y)

DLF4 - Statische Ersatzlasten

Alle Eigenformen

FE-Netz Punkt	A Eigenform Nr.	B LF Nr.	C Objekt Typ	D X [m]	E Stelle Y [m]	F Z [m]	G F <sub>x</sub> [N]	H F <sub>y</sub> [N]	I F <sub>z</sub> [N]	J M <sub>z</sub> [Nm]
1	1	4	Fläche	0.000	0.000	-8.000	1.206	0.651	-0.003	0.034
2	2	8	Fläche	0.000	0.000	-8.000	-2.552	-393.449	1.210	4.829
3	3	10	Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.226	0.236	-0.001	0.011
4	4		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.226	0.236	-0.001	0.011
5	5		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.226	0.236	-0.001	0.011
6	6	16	Fläche	0.000	0.000	-8.000	-1.270	0.013	0.003	0.045
7	7		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-1.270	0.013	0.003	0.045
8	8		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-1.270	0.013	0.003	0.045
9	9		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-1.270	0.013	0.003	0.045
10	10	22	Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.103	0.040	0.000	0.004
11	11		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.103	0.040	0.000	0.004
12	12		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.103	0.040	0.000	0.004
13	13		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.103	0.040	0.000	0.004
14	14		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.103	0.040	0.000	0.004
15	15		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.103	0.040	0.000	0.004
16	16	28	Fläche	0.000	0.000	-8.000	0.001	-0.001	0.000	0.000
17	17		Fläche	0.000	0.000	-8.000	0.001	-0.001	0.000	0.000
18	18		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.001	0.000	0.000	0.000
19	19		Fläche	0.000	0.000	-8.000	-0.001	0.001	-0.001	0.000

Ersatzlasten (Erregungen in X) Ersatzlasten (Erregungen in Y) Ersatzlasten (Erregungen in Z)

**Bild 4.23:** Ergebnistabelle 5.9: Generierte Ersatzlasten aus Antwortspektren in  $Y$ -Richtung.

## Torsionsmomente

Zufällige Torsionswirkungen können wie in [Abschnitt 2.8.4](#) beschrieben berücksichtigt werden, um Unsicherheiten in der Anordnung der Massen in Betracht zu ziehen. Der Massenmittelpunkt wird als verschoben durch die zufälligen Exzentrizitäten  $e_X$  und  $e_Y$  betrachtet. Die Torsionsmomente werden folgendermaßen berechnet:

$$M_Z = |F_X \cdot e_Y| + |F_Y \cdot e_X| \quad (4.12)$$

$M_Z$  ist das Torsionsmoment und  $F_X$  und  $F_Y$  sind die Ersatzlasten an jedem FE-Knoten, wie in den [Gleichungen 4.9, 4.10 und 4.11](#) definiert. Die Torsionsmomente  $M_Z$  werden sowohl in positive als auch in negative Richtungen berücksichtigt.

## Exportierte Lastfälle

Die Ersatzlasten, wie sie in den dynamischen Ergebnistabellen aufgeführt sind, werden als Lastfälle in das Hauptprogramm RFEM exportiert. Dies wird getrennt für jeden Eigenwert und jede Erregungsrichtung vorgenommen. Die Liste der generierten Lastfälle kann in der Maske *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* geändert werden. Die Berechnungsparameter können nicht geändert werden, eine geometrische lineare statische Berechnung wird durchgeführt.



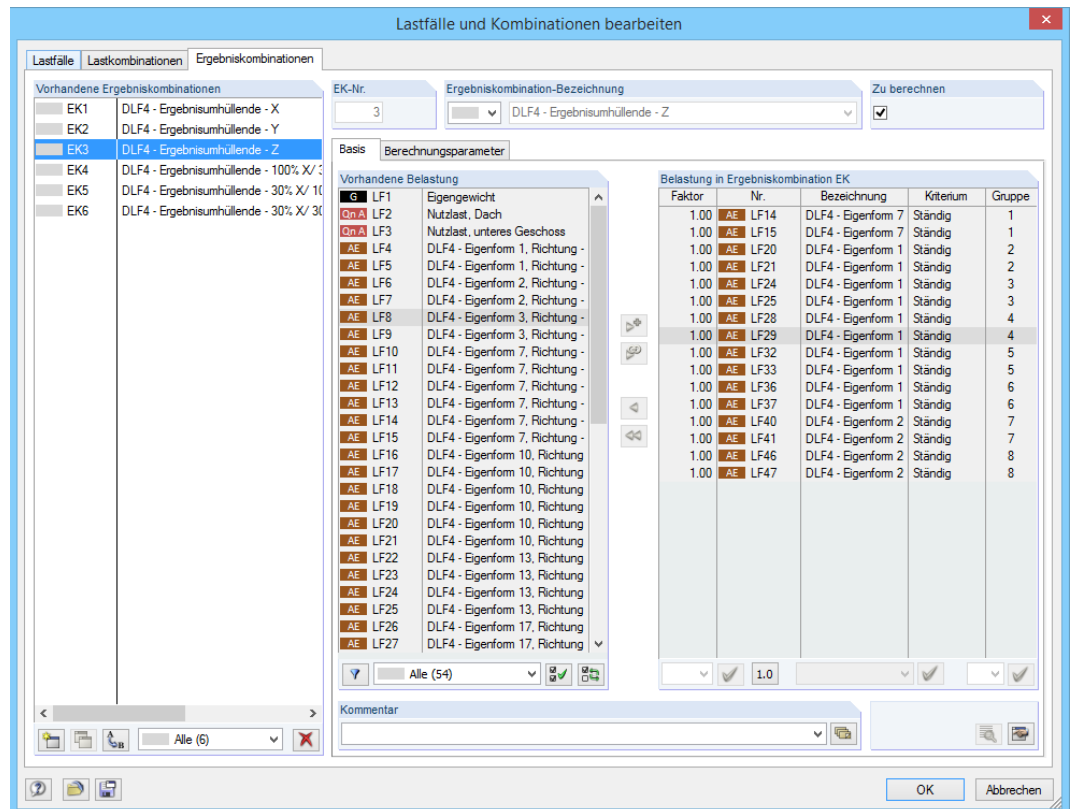
Die generierten Ersatzlasten können mit der Schaltfläche [Lasten anzeigen] sichtbar gemacht werden. Wenn mehr als 10000 Lasten generiert werden, wird die Anzeige standardmäßig deaktiviert. Jedoch kann im Dialog *Details* die Anzahl der angezeigten Ersatzlasten geändert werden. Dies wurde in [Abschnitt 2.9](#) erläutert.



Wenn die zufälligen Torsionswirkungen (in [Abschnitt 2.8.4](#) erläutert) aktiviert werden, werden zwei Lastfälle für jede Form und Richtung generiert. Die Torsionsmomente werden sowohl in positive als auch in negative Richtungen berücksichtigt. Diese beiden Lastfälle werden zunächst als eine alternative Gruppe kombiniert, bevor die Modalantworten mit der *SRSS*-Regel kombiniert werden.

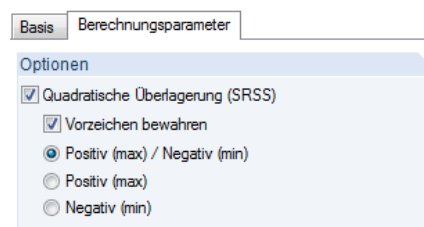
## Exportierte Ergebniskombinationen

Wenn ein Ersatzlastverfahren im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* durchgeführt wird, werden Ergebniskombinationen in zwei Schritten erzeugt: (1) Die Modalantworten werden mit der *SRSS*-Regel kombiniert und die Ergebnisse werden in EKs getrennt für jede Erregungsrichtung exportiert und (2) die richtungsabhängigen Ergebnisse werden entweder mit der *SRSS*-Regel oder mit der 100 % / 30%-Regel kombiniert und die endgültigen EKs werden exportiert. Eine Liste der generierten Ergebniskombinationen kann im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*, dargestellt in [Bild 4.24](#), aufgerufen werden.



**Bild 4.24:** Exportierte Ergebniskombinationen aus dem Ersatzlastverfahren, dargestellt im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*. Hier ist die EK mit den kombinierten Modalantworten in *Z*-Richtung ausgewählt.

In [Bild 4.24](#) wird unter *Belastung in Ergebniskombination EK* eine Liste von LFs angegeben, die verwendet werden, um die EK in *Z*-Richtung zu bilden. Diese LFs werden mit der *SRSS*-Regel, wie in [Bild 4.25](#) dargestellt, kombiniert.

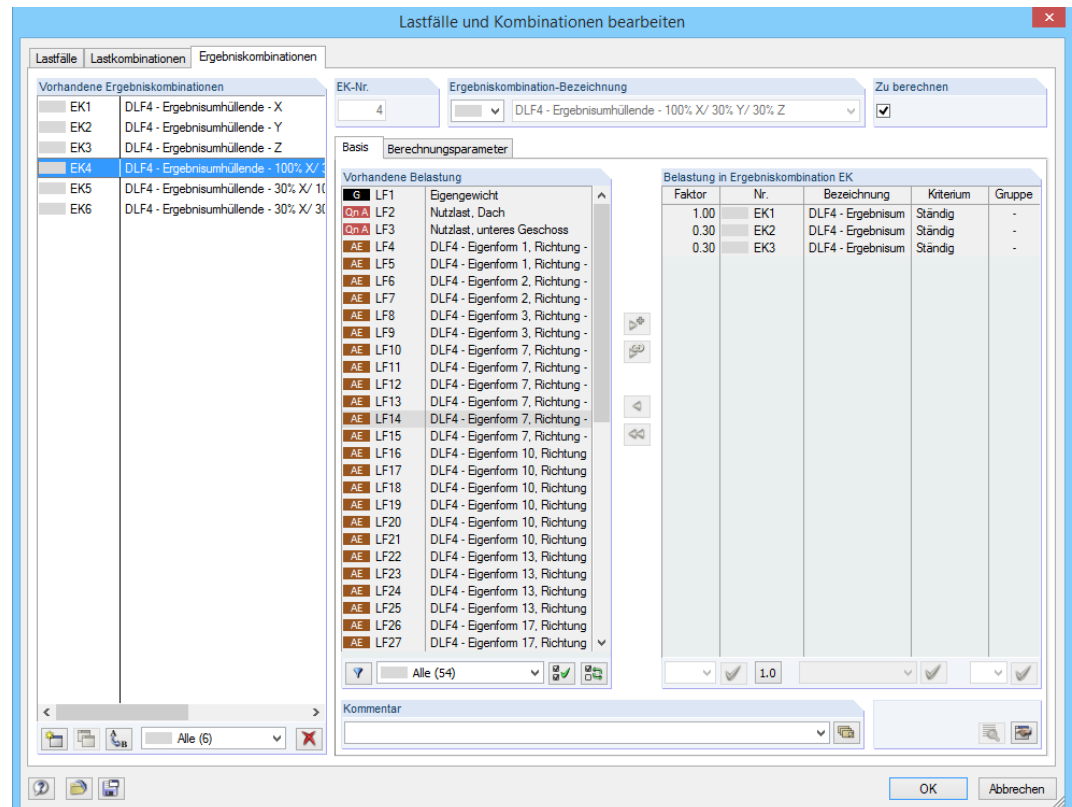


**Bild 4.25:** Berechnungsparameter der exportierten EKs, kombiniert mit Modalantworten. Die *SRSS*-Regel wird angewendet.

Das Kontrollfeld *Vorzeichen bewahren* ist standardmäßig ausgewählt und es wird die *SRSS*-Regel angewendet, wie in [Gleichung 2.16](#) angegeben. Wenn dieses Kontrollfeld deaktiviert wird, wird die Standardform der *SRSS*-Regel verwendet ([Gleichung 2.15](#)). Es kann auch ausgewählt werden, ob

sowohl maximale als auch minimale Ergebnisse oder nur eines von beiden in den Ergebniskombinationen gespeichert werden soll, indem die Auswahlfelder in Bild 4.25 entsprechend ausgewählt werden.

Im zweiten Schritt werden die Antworten, die aus verschiedenen Erregungsrichtungen stammen, kombiniert; eine der finalen EKs ist in Bild 4.26 ausgewählt. Bitte die Faktoren 1 und 0.3 beachten, die verwendet werden, um die 100% / 30%-Regel anzuwenden.



**Bild 4.26:** Exportierte Ergebniskombinationen aus dem Ersatzlastverfahren, dargestellt im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*. Hier ist die EK mit der richtungsabhängigen Kombination mit der 100% / 30%-Regel ausgewählt.

## 4.5 Ausdruckprotokoll

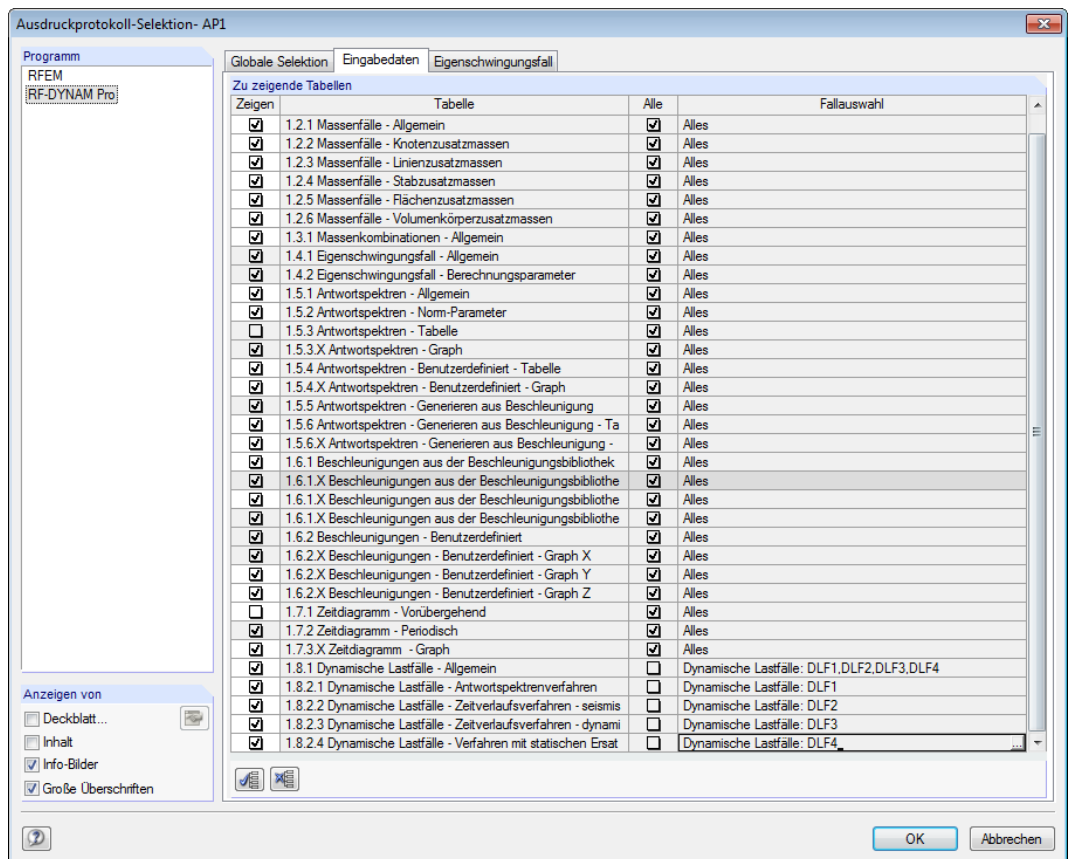
Es ist möglich ein Ausdruckprotokoll mit den dynamischen Ergebnissen erzeugen. Detaillierte Informationen zum Ausdruckprotokoll finden Sie im **Kapitel 10** des **RFEM-Handbuchs**.

Wenn dynamische Ergebnisse vorhanden sind, besteht die Möglichkeit auszuwählen, ob *Eingabedaten* und Ergebnisse der *Eigenschwingungsfälle* in der *Ausdruckprotokoll-Selektion* enthalten sein sollen, wie in den Bildern 4.27 und 4.28 dargestellt ist.

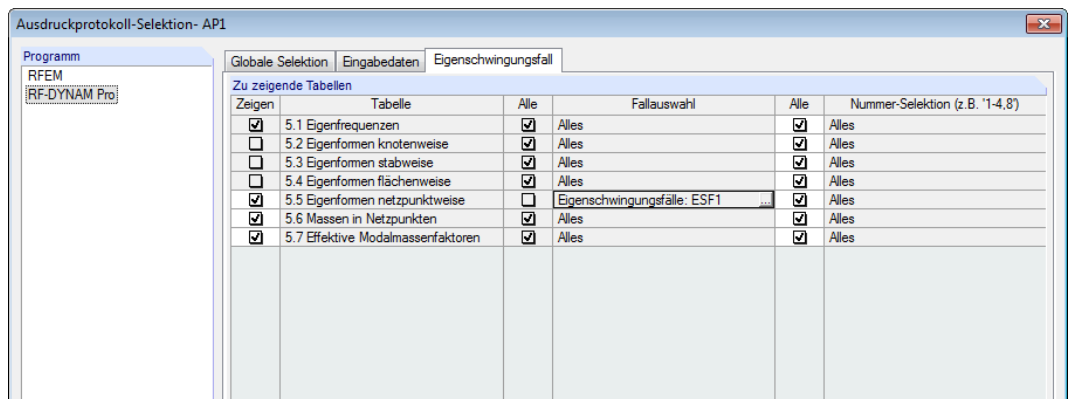
Jeder Eintrag kann für alle Fälle (*ESFs* oder *DLFs*) ausgewählt werden oder das Kontrollfeld *Alle* kann deaktiviert werden und es werden nur einzelne Fälle (*ESF* oder *DLF*) ausgewählt.



Alle anderen *RF-DYNAM Pro*-Ergebnisse sind in exportierten Lastfällen oder Ergebniskombinationen verfügbar. Das Ausdruckprotokoll für diese Ergebnisse kann angepasst werden, wie in **Kapitel 10** des **RFEM-Handbuchs** erläutert.



**Bild 4.27:** Ausdruckprotokoll-Selektion mit den für *RF-DYNAM Pro*-Fall verfügbaren Eingabedaten.



**Bild 4.28:** Ausdruckprotokoll-Selektion mit dem verfügbaren Eigenschwingungsfall (ESF)-Daten.

## 4.6 Einheiten und Dezimalstellen



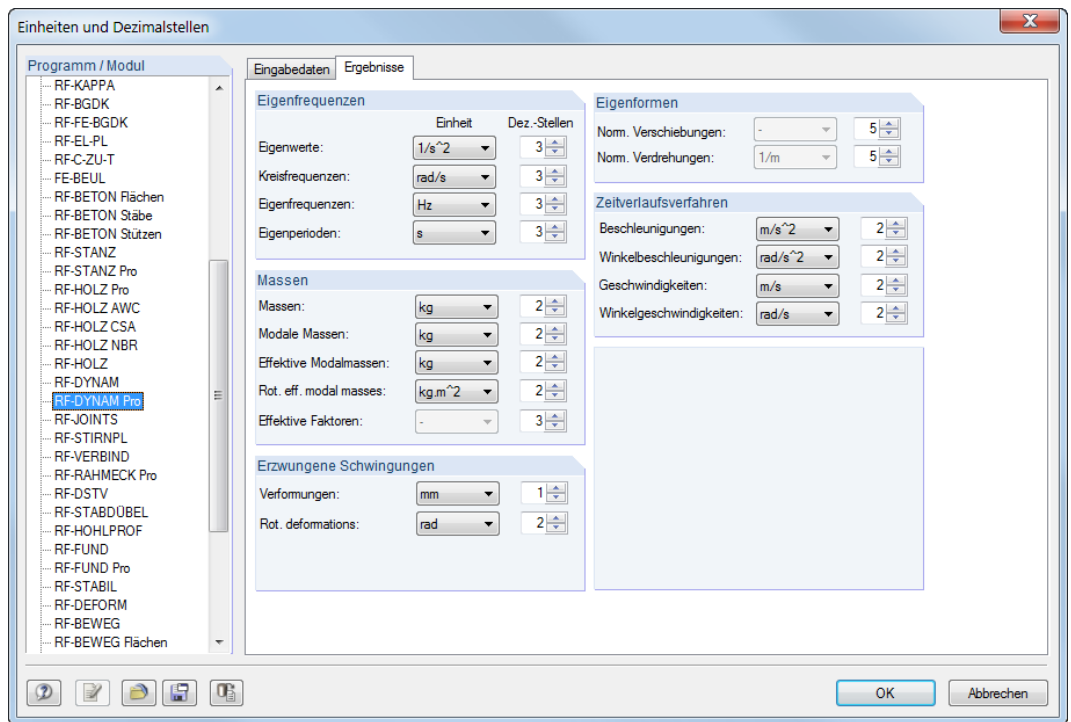
Der Dialog *Einheiten und Dezimalstellen* kann mit der links dargestellten Schaltfläche aufgerufen werden. Der Dialog mit dem geöffneten Register *Ergebnisse* des Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro* ist in [Bild 4.29](#) dargestellt.

In der Liste der Module wird *RF-DYNAM Pro* ausgewählt und man kehrt wieder zum Register *Ergebnisse* zurück. Einheiten können aus den Drop-Down-Menüs ausgewählt und Dezimalstellen können angepasst werden.

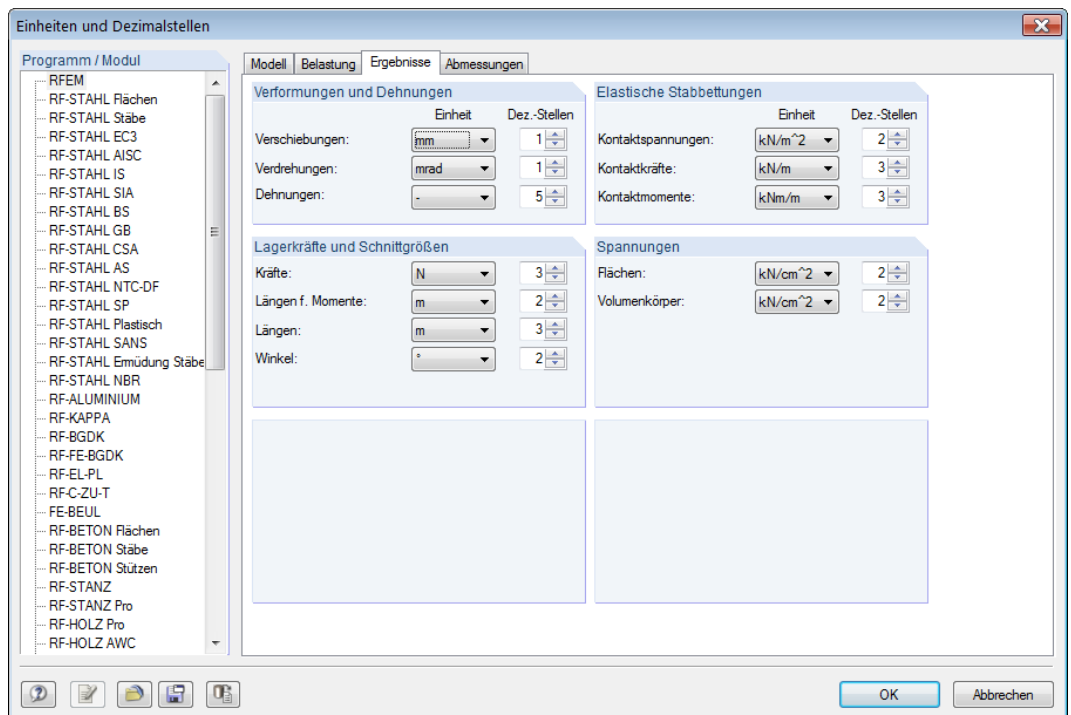


Da die Ergebnisse aus *RF-DYNAM Pro* im Hauptprogramm RFEM integriert sind, können die meisten Ergebniswerte in der RFEM-Liste der Einheiten und Dezimalstellen angepasst werden, wie in [Bild 4.30](#) dargestellt.





**Bild 4.29:** Darstellung des Dialogs *Einheiten und Dezimalstellen*, in dem die Einheiten und Dezimalstellen der Ergebnisdaten aus *RF-DYNAM Pro* angepasst werden können.



**Bild 4.30:** Darstellung des Dialogs *Einheiten und Dezimalstellen* mit dem geöffneten Register *Ergebnisse* von RFEM.

## 5 Beispiele

Dieses Handbuch wird in Kürze mit Beispielen erweitert, bitte prüfen Sie unsere Website [www.dlubal.com/de/handbuecher-zu-kategorie-dynamik.aspx](http://www.dlubal.com/de/handbuecher-zu-kategorie-dynamik.aspx) regelmäßig nach Aktualisierungen dieses Handbuches.

Verifikationsbeispiele sind auf unserer Webseite verfügbar, diese dienen der Prüfung der Ergebnisse. Bitte schauen Sie auf unserer Webseite [www.dlubal.com/en/examples.aspx?category=Dynamic%20Analysis](http://www.dlubal.com/en/examples.aspx?category=Dynamic%20Analysis).

Ein Beispiel zur Durchführung einer Eigenschwingungsanalyse und eines multimodalen Antwortspektrenverfahrens mit dem Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* wurde im Webinar *Ermittlung von Eigenschwingungen und Erdbebenbemessung mit RF-DYNAM Pro* behandelt. Das Video können Sie sich unter <https://www.dlubal.com/de/webinare.aspx> herunterladen.

# Literatur

- [1] *EN 1998-1: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [2] *DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- [3] *IBC2012: International Building Code.* International Code Council, 2011.
- [4] *EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [5] Christian Barth und Walter Rustler. *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis.* Beuth, Berlin, 2. Auflage, 2013.
- [6] Klaus-Jürgen Bathe. *Finite Element Procedures.* Prentice Hall, 1996.
- [7] Hans-Günter Natke. *Baudynamik.* B. G. Teubner, Stuttgart, 1989.
- [8] Edward L. Wilson. *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures.* Computer and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 3rd Auflage, 2002.
- [9] Joseph W. Tedesco, William G. McDougal und C. Allen Ross. *Structural Dynamics : Theory and Applications.* Addison-Wesley, 1st Auflage, 1999.
- [10] U.Stelzmann, C.Groth und G.Müller. *FEM für Praktiker - Band 2: Strukturdynamik.* Expert Verlag, 2008.
- [11] C. Katz. *Anmerkung zur Überlagerung von Antwortspektren.* D-A-CH Mitteilungsblatt, 2009.
- [12] Inc. ANSYS. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, Release 15.0.,* 2013.
- [13] K. Meskouris, K.-G. Hinzen, C. Butenweg und M.Mistler. *Bauwerke und Erdbeben.* Vieweg und Teubner, Berlin, 3. Auflage, 2011.
- [14] *Programmbeschreibung RSTAB/RFEM.* DLUBAL GmbH, 2009.
- [15] Ivan Němec und Vladimír Kolář. *Finite Element Analysis of Structures - Principles and Praxis.* Shaker Verlag, Aachen, 2010.
- [16] C. Petersen. *Dynamik der Baukonstruktionen.* Vieweg, 1996.
- [17] Manual SAP2000. *CSI Analysis Reference Manual - For SAP2000, ETABS, and SAFE2007.,* 2007.
- [18] V. Červenka, L. Jendele und J. Červenka. *ATENA Program Documentation Part 1 - Theory.* Červenka Consulting s.r.o., 2014.
- [19] *SIA 261:2003: Einwirkungen auf Tragwerke.* Schweizerische Normen-Vereinigung, 2003.
- [20] *OENORM B4015:2007: Belastungsannahmen im Bauwesen - Außergewöhnliche Einwirkungen: Erdbebeneinwirkung.* ON Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [21] *NBC2010: National Building Code of Canada.* Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council of Canada, Thirteenth Auflage, 2010.

# Index

Eigenformen	46	Eigenwert	14, 17, 45
Strukturdämpfung	36	Eigenwertlöser	17
<b>A</b>			
Abbrechen	9	Eingabedaten	8
Akzelerogramm	8, 9, 21, 22, 31	Einheiten	9, 40, 60
Akzelerogramm zuweisen	33	Einheitsmatrix	16
Allgemeine Parametereinstellungen	38	Einmassenschwinger	22
Anfangsbedingung	18	Einwirkende Massen	15
Anfangsverformung	33, 36	EN 1990	13
Antwortspektren anzeigen	18, 30, 39	EN 1998-1	13, 30, 37
Antwortspektrenverfahren	8, 28, 36, 48, 56	Erdbebenaufzeichnungen	22, 23
Antwortspektrum	9, 18, 21, 48	Erdbeschleunigung	39
Antwortspektrum zuweisen	29, 37	Ergebniskombination	28, 30, 33, 36, 38, 58
Ausdruckprotokoll	55, 59	Ergebnisse	44
Ausfallender Stab	18	Ermittlung der Instabilität	39
<b>B</b>			
Baunormen	19	Erregungsrichtung	29, 33, 35, 37
Beispiele	62	Ersatzlasten	4, 9, 36, 39, 56
Berechnung	9, 41	Ersatzlastverfahren	9, 36, 56
Beschleunigung	8, 22, 31, 53	Erzwungene Schwingungen	3, 8, 28, 31, 35
Beschleunigung von Antwortspektren	30	Export	28, 30, 33, 36, 38, 57, 58
Beschleunigungs-Zeit-Diagramm	22, 31	<b>F</b>	
Beschleunigungsrichtung	38	FE-Netz	17
Bibliothek	23	Flächengrundspannungen	50, 52
<b>D</b>			
Dämpfung	30, 33, 36	Flächenmasse	11, 12
Deaktivierte Stäbe	18	Flächenschnittgrößen	50, 52
Demoversion	8	Frequenz	15, 45
Details	9, 10, 38	Funktion	25
Dezimalstellen	9, 40, 60	<b>G</b>	
Diagonale Massenmatrix	16	Gesamtmasse	11
Diagonale Massenmatrix mit Torsionselementen	16	Geschwindigkeiten	53
Direkte Integration	27, 33	Globale Änderung der Steifigkeit	18
Drehung	46	<b>H</b>	
Dynamischer Lastfall	8, 9, 27	Harmonische Erregung	25
<b>E</b>			
Effektive Modalmasse	46	Hilfe	9
Effektiver Modalmassenfaktor	14, 15, 30, 46	<b>I</b>	
Eigenformen	8, 17, 28, 30, 36, 38, 45	ICG-Iteration	17
Eigenfrequenz	8, 14, 15, 30, 45	<b>K</b>	
Eigengewicht	10	Knotenbeschleunigung	53
Eigenperiode	45	Knotengeschwindigkeiten	53
Eigenschwingungen	2, 8, 14, 45	Knotenmasse	11
Eigenschwingungsfall	8, 9, 14, 15, 27, 45	Knotenverformung	49, 51
		Kombinationsfaktor	10, 13
		Kombinationsregeln	29, 37
		Konsistente Massenmatrix	16
		Kontrolle	9, 41

Kreisfrequenz .....	25, 45	
<b>L</b>		
Längenänderung für Seile und Membrane .....	39	
Lagerkraft .....	48, 51	
Lagersätze .....	28, 32	
Lanczos .....	17	
Lasten - Zeitdiagrammsatz .....	35	
Lastfall .....	10, 28, 33, 35, 36, 38, 57	
Lehrsche Dämpfung .....	30, 33	
Linienmasse .....	11, 12	
<b>M</b>		
Masse .....	10, 46	
Massen in Netzknoten .....	46	
Massenfall .....	8, 9, 10, 13, 15	
Massenfalltyp .....	10	
Massenimport .....	10	
Massenkombination .....	8, 9, 13	
Massenmatrix .....	11, 12, 16	
Massenrichtung .....	12, 15	
Massenträgheitsmoment .....	11	
Massenumwandlungstyp .....	10	
Maximale Zeit .....	33, 36	
Modalanalyse .....	27, 33	
Modalantworten .....	29, 37	
Modale Dämpfung .....	30	
Modalmassen .....	17, 46	
Multimodal .....	38	
Multimodales Antwortspektrenverfahren .....	18, 30, 36	
Multipunkt-Erregung .....	18, 28, 32	
<b>N</b>		
Navigator .....	7	
Normalkräfte .....	18	
<b>P</b>		
Panel .....	7	
Periodische Erregung .....	25	
Programmstart .....	6	
Projekt-Navigator .....	7	
<b>Q</b>		
Quadratischer Mittelwert .....	54	
Quadratsummenwurzel-Regel (SRSS) .....	29, 37	
<b>R</b>		
Rayleigh-Koeffizienten .....	33	
RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen .....	2, 8, 14,	
	45	
RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten .....	4, 9, 18, 36, 56	
RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen .....	3, 8, 18, 22, 25, 28, 31, 35, 48	
RF-DYNAM Pro öffnen .....	6	
RF-DYNAM Pro starten .....	6	
Rotation .....	15, 29, 33	
<b>S</b>		
Schwerkraft .....	39	
Schwerpunkt der Masse .....	10, 11	
Skalierung der Eigenformen .....	17	
Stabmasse .....	11, 12	
Stabschnittgröße .....	49, 52	
Standardisierte Drehung .....	46	
Standardisierte Verschiebung .....	46	
Start der Berechnung .....	41	
Steifigkeit RF-BETON .....	18	
Steifigkeitsänderung .....	18	
Strukturdämpfung .....	30, 33	
Summe der Massen .....	11	
<b>T</b>		
Testversion .....	8	
Torsion .....	16, 37, 57	
Torsionsmoment .....	37, 57	
Transiente Erregung .....	25	
<b>U</b>		
Umwandlungstyp für die Masse .....	38	
Unterraum-Iteration .....	17	
<b>V</b>		
Verdrehung .....	46	
Viskose Dämpfung .....	21	
Vollständige quadratische Kombinationsregel (CQC) .....	29	
Vorzeichen bewahren .....	37	
<b>W</b>		
Wahl der Eigenform .....	30, 38	
Wurzel des charakteristischen Polynoms .....	17	
<b>Z</b>		
Zeitdiagramm .....	8, 9, 25, 35	
Zeitschritte .....	33, 36	
Zeitverlaufsdiagramm .....	53	
Zeitverlaufsverfahren .....	8, 25, 27, 31, 35, 50	
Zufällige Torsionswirkungen .....	37, 57	