**Interaktive Berechnungen im Bauingenieurwesen nach der Methode der Finiten Elemente**

**FE-Berechnungen**

Klassische Programme für Berechnungen im Bauingenieurwesen nach der Methode der Finiten-Elemente sind geprägt von drei separaten Schritten, der Aufbereitung der Eingabedaten für eine Berechnung und dem Einlesen dieser Daten in das eigentliche Berechnungsprogramm (Präpozessor), der Ausführung der Berechnung (Prozessor) und der Ausgabe der Ergebnisdaten (Postprozessor).

Diese drei separate Prozesse sind i.d.R. jeder für sich relativ aufwändig und machen häufig eine schnelle und einfache Variation der Eingabedaten und die Beurteilung der Konsequenzen und Ergebnisse dieser Änderungen schwierig und zeitaufwändig.

Die Anforderungen für die Ausbildung von Studierenden des Bauingenieurwesen erfordern jedoch die Entwicklung eines Verständnisses z.B. der Konsequenzen von Änderungen im Tragwerkentwurf auf das Tragverhalten. Im Allgemeinen sollte es einfach und schnell möglich sein, Änderungen im Modellentwurf zu definieren, die entsprechende Neuberechnung durchzuführen und deren Ergebnisse und Konsequenzen zu beurteilen.

Die Anforderungen eines praktisch tätigen Entwurfsingenieur (z.B. Statiker) erfordern ebenfalls schnelle und einfache Möglichkeiten der Untersuchung vielfältiger Variationsmöglichkeiten der Entwurfsdaten und die Beurteilung von Konsequenzen der Auswahl unterschiedlicher Varianten, um damit zu einem optimierten Entwurf zu gelangen.

Beide Anforderungen lassen sich bei der klassischen Vorgehensweise nur sehr schwierig oder kaum ermöglichen.

Ziel sollte es sein, einen Entwurfsvorgang durch interaktive Einflussmöglichkeiten des Nutzers auf Variationen der Modelldaten und durch grafisch, interaktive Darstellungen der Ergebnisdaten so weit und unmittelbar zu unterstützen, dass Studenten ein leichteres Verständnis z.B. des Tragverhaltens von Bauwerken entwickeln können und praktisch tätige Entwurfsingenieure leichter zu optimierten Modellentwürfen, z.B. im Tragwerksentwurf, gelangen können.

Dies sind die Hauptziele der hier beschriebenen Programmumgebung.

Prof. Dr.-Ing. Karl E. Beucke, Ettersburg 2025

Grundlage einer jeden Berechnung ist die Definition eines **Modells** mit entsprechenden **Modelldaten**, die das **Modellverhalten** bestimmen.

In der Regel werden die Ausgangsdaten für die Definition eines neuen Modellls in einer Textdatei mit vordefinierten Schlüsselwörtern und entsprechenden Definitionsinhalten festgelegt. Diese unterscheiden sich je nach Anwendungsgebiet und sind im Anhang beschrieben.

Eine solche Textdatei, die im Dateisystem eines Rechners dauerhaft gespeichert wird (persistentes Modell), dient zum Einlesen eines neuen Modells für eine Berechnung. Das persistente Modell wird i.d.R. während der Laufzeit eines Berechnungsvorgangs nicht verändert.

Während des Einlesens eines neuen, persistent gespeicherten Modells (Textdatei) wird in der Laufzeitumgebung des Berechnungsprogrammes ein intern gespeichertes Modell (transientes Modell) erzeugt. Das transiente Modell kann durch umfassende Interaktionsmöglichkeiten des Nutzers auf vielfältige Weise in seinen Definitionen verändert und variiert werden, sodass **unterschiedliche Modellzustände** beschrieben werden können.

Der jeweilige **Modellzustand** des transient gespeicherten Modells wird in einem neuen Fenster visualisiert (**grafische Modelldarstellung**). Diese Modelldarstellung kann interaktiv vom Nutzer verändert werden und dient schliesslich als Grundlage einer neuen Modellberechnung. Die Ergebnisse einer jeden neuen Modellberechnung werden ebenfalls in einem neuen Fenster dargestellt (**grafische Ergebnisdarstellung**) und können interaktiv abgefragt und untersucht werden.

Unterschiedliche Modellzustände können parallel in separaten Modell- und Ergebnisdarstellungen gegenübergestellt, untersucht und verglichen werden.

**Definition der Daten eines neuen Modells:**

Die Modelldaten bestehen aus **Knoten**, welche die Modell**geometrie** bestimmen, aus **Elementen**, welche die Modell**topologie** bestimmen, aus äußeren **Einwirkungen** (Lasten) auf das Modell und aus **Randbedingungen** (Lager).

Die Definition sämtlicher Daten für ein konkretes, vollständiges Modell erfolgt in der Regel in einer separaten Textdatei, da dies häufig effizienter und einfacher ist als in interaktiven Nutzerdialogen.

Als Anwendungsgebiete wurden exemplarisch die Tragwerksberechnung, Wärmeberechnung und Elastizitätsberechnung ausgewählt.

Die **Tragwerksberechnung** wird häufig als ein gesonderter Spezialfall von Bauwerksberechnungen behandelt. Sie ist aber für Bauingenieure von zentraler Bedeutung und soll in diesem Zusammenhang auf der gleichen allgemeinen Basis vorgestellt werden wie andere physikalische Berechnungen. Sie wird hier als 1D oder 2D Idealisierung mit 2 oder 3 Freiheitsgraden behandelt.

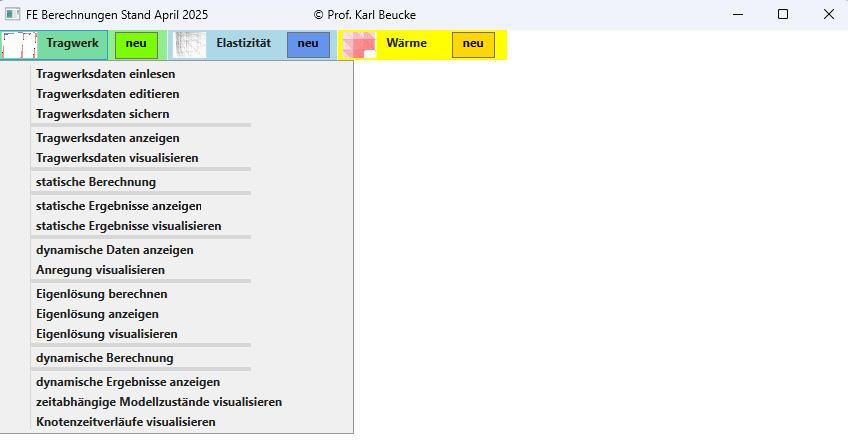
Die physikalisch einfachste Berechnung ist die **Wärmeberechnung**, die auf der gleichen allgemeinen Basis behandelt wird. Hier werden Implementierungen in 1D und 2D vorgestellt mit 1 Knotenfreiheitsgrad.

Tragwerksberechnungen sind in der Regel ein spezieller Fall allgemeiner Festigkeitsberechnungen, die aus der Elastizitätstheorie abgeleitet werden und sie werden daher in der Praxis häufig zusammen behandelt. Der allgemeinere Fall der **Elastizitätsberechnung** wird in der Ausbildung aber häufig erst später behandelt, da sowohl Theorie und Interpretation der Ergebnisse anspruchsvoll sind. Ergebnis einer Elastizitätsberechnung sind Dehnungen und Spannungen, die in der praktischen Nutzung häufig nicht direkt nutzbar sind, da hier in der Regel Elementschnittkräfte genutzt werden.

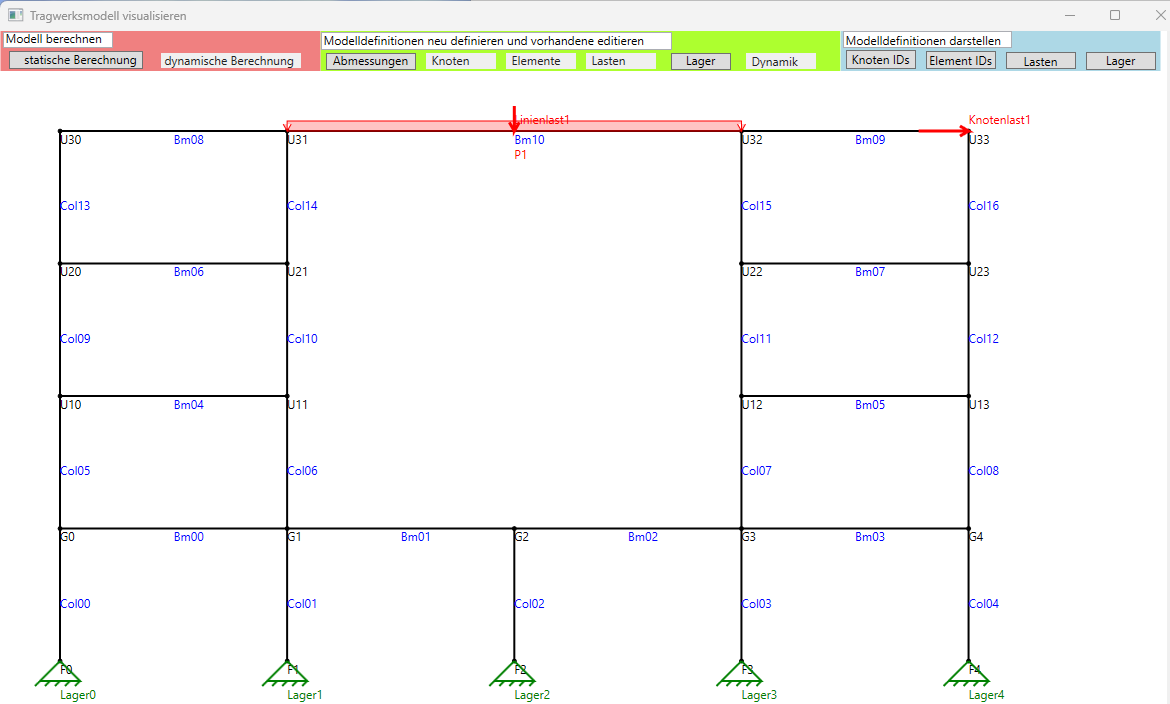
Physikalische Berechnungen werden in der Regel untersucht für Lasteinwirkungen, die zeitlich unveränderlich sind. Dies wird in der Tragwerksberechnung als „statisch“ und in der Wärmeberechnung als „stationär“ bezeichnet. Sollen zudem aber auch zeitlich veränderlich wirkende Lasteinwirkungen wie Wind, Erdbeben oder Wärmeeinwirkungen wie Anfahrkurven für einen Kamin berücksichtigt werden, so werden Verfahren für instationäre Wärmeberechnungen oder dynamische Tragwerksberechnungen benötigt.

Einfache Beispiele stehen in einem **Unterverzeichnis „input“** für die unterschiedlichen Anwendungsgebiete zur Verfügung. Alle Eingabedateien sind gekennzeichnet durch die Dateiendung „inp“. Jede Modelldefinition ist durch einen Texidentifikator eindeutig gekennzeichnet.

„Leere“ Eingabedateien mit auskommentierten Schablonen als Beispiele für die jeweils unterstützten Arten von Eingabezeilen stehen in Dateien „Vorlage.inp“ zur Verfügung.

Das Startmenü der Anwendung bietet die drei Themengebiete (Tragwerk, Elastizität, Wärme) an mit dem kompletten Funktionsumfang jedes einzelnen Themengebietes jeweils als Aufklappmenü unter dem jeweiligen Themengebiet (z.B. Tragwerk).

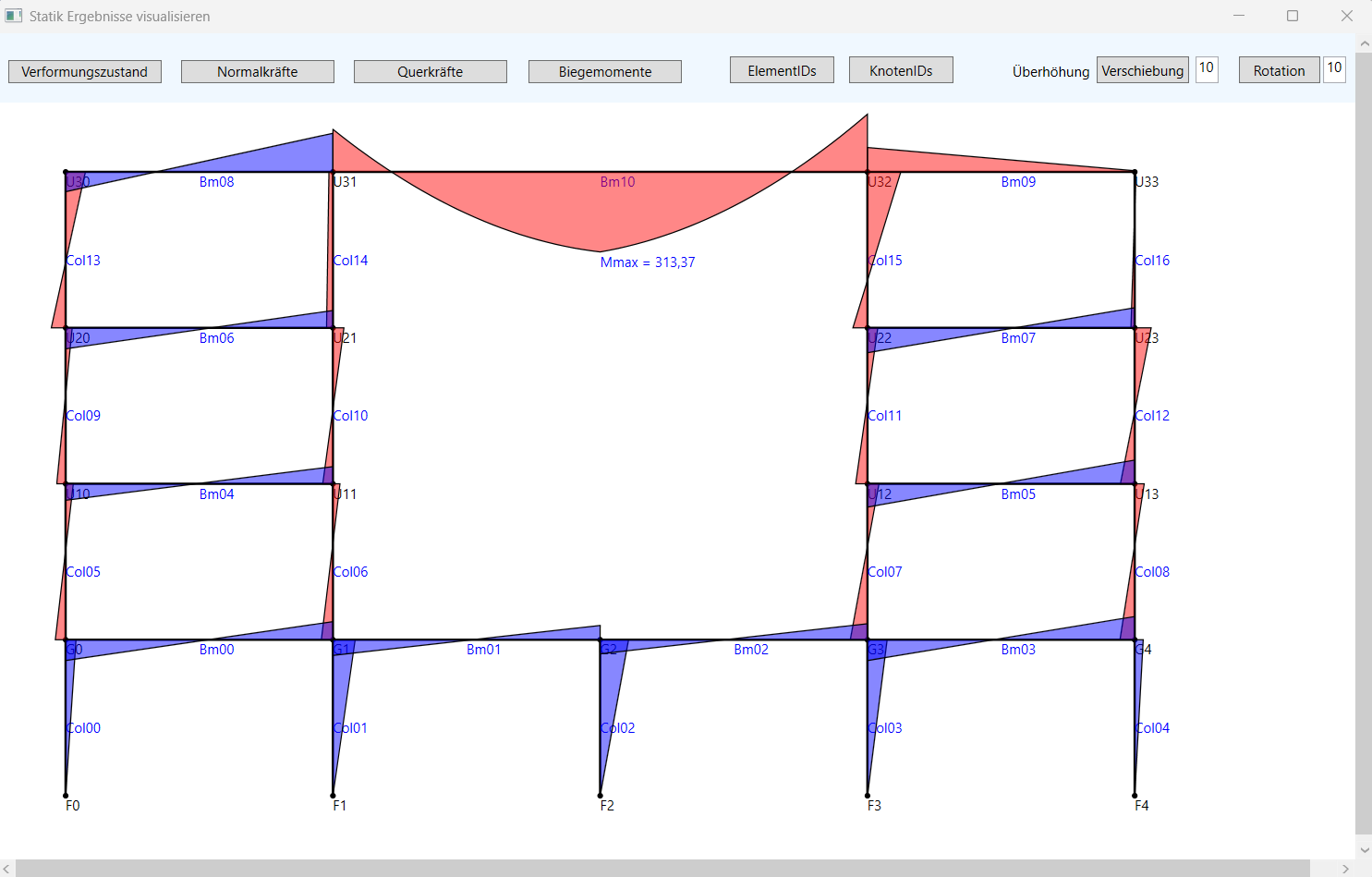
Zusätzlich gibt es für jedes Themengebiet die Menüauswahl „**neu**“, die Eingabedaten für eine neue Modelldefinition aus vordefinierten Beispieldaten im Unterverzeichnis „input“ anbietet.

Nach dem Einlesen neuer Modelldaten wird die entsprechende Modelldefinition unmittelbar visualisiert.

hier z.B. die Darstellung eines Gebäudemodells, das im Unterverzeichnis „input“ zur Verfügung steht.

Die Visualisierung des Gesamtmodells erfolgt über die Ermittlung der maximalen Abmessungen des Modells und deren Transformation in Bildschirmkoordinaten des entsprechenden Darstellungsfensters. Die Menüauswahl „Abmessungen“ erlaubt eine nutzerdefinierte Festlegung der maximalen Modellabmessungen.

Die Auswahl „**statische Berechnung**“ führt eine Berechnung der aktuellen, dargestellten Modelldefinition durch und öffnet ein neues Fenster mit einer Auswahl der entsprechenden Berechnungsergebnisse.



Der Hauptfokus der vorliegenden Implementierung liegt auf umfassenden Funktionalitäten für interaktive Modellveränderungen, die zu einer unmittelbaren Neuberechnung und Visualisierung der entsprechenden Ergebnisse in einem neuen Fenster führen.

**Interaktive Modelländerungen** für Tragwerksberechnungen werden im Fenster „Tragwerkmodell visualisieren“ durchgeführt unter der Menüleiste:



* **Abmessungen** für die Darstellung des Gesamtmodells können geändert werden
* **Knoten**definitionen können hinzugefügt, gelöscht oder interaktiv verschoben werden,
* **Elemente** können hinzugefügt, gelöscht oder deren Eigenschaften editiert werden. In den entsprechenden Nutzerdialogen kann dabei vielfach Bezug genommen werden auf bestehende Knoten oder Eigenschaften anderer Elemente. Material- und Querschnittswerte können definiert oder editiert werden.
* **Lasten** und **Lager** können definiert oder verändert werden, wobei wiederum interaktiv Bezug genommen werden kann auf bestehende Knoten oder Elemente.
* **Dynamik** ermöglicht die Definition oder Änderung der **Integrationsparameter** fürdynamische Brechnungen, **Anfangsbedingungen** können ggf. definiert oder editiert werden, **zeitlich veränderliche Knotenlasten** können neu definiert oder editiert werden und zugehörige **Anregungsfunktionen** können visualisiert werden.

Für jede Auswahl wird ein entsprechendes Dialogfenster der jeweils gewählten Auswahl geöffnet. Änderungen die darin vorgenommen werden, werden direkt in die aktuelle Modelldeinition übernommen.

**Knoten neu, editieren, löschen**

Die Menüauswahl **Knoten** öffnet ein Untermenü mit den Optionen

* Knoten
* Knotengruppe
* äquidistantes Knotennetz
* Variables Knotennetz

Die Unterauswahl **Knoten** öffnet einen neuen Benutzerdialog für einen Knoten. Im Allgemeinen haben Knoten in der Tragwerksberechnung 3 Knotenfreiheitsgrade, daher ist diese Angabe voreingestellt. Wird diese Einstellung auf 2 geändert, so wird ein Knotengelenk eingefügt.

Wird das Eingabefeld „Knoten ID“ angewählt, wird eine Tabelle mit bereits bestehenden Knotenidentifikatoren zur Unterstützung der Eingabe angezeigt.

Durch Eingabe eines bereits bestehenden Knotenidentifikators werden die aktuellen Werte des zugehörigen Knotens dargestellt und diese können editiert und mit “Ok” akzeptiert werden.

Die Knotenwerte für die Definition neuer Knoten können im Benutzerdialog ausgefüllt werden und einzeln in eine Tabelle eingetragen werden. Sämtliche Tabelleneinträge können durch Auswahl von “Ok” in das Modell übernommen werden.

Die Auswahl **Knotengruppe** öffnet einen Dialog zur Definition einer Gruppe von Knoten, die alle mit einem einheitlichen Präfix für eindeutige KnotenIds generiert werden. Folglich müssen nur das einheitliche Präfix und die jeweiligen Knotenkoordinaten eingegeben werden. Die generierten Knoten werden erst nur tabellarisch dargestellt und erst mit der Bestätigung “**Ok**” in das Modell übernommen.

Die Unterauswahlen “**äquidistantes Knotennetz**” und “**variables Knotennetz**” öffnen jeweils einen Dialog zur Definition eines Kontennetzes mit einer Folge gleicher oder variabler Knotenabstände in 1D oder 2D. Gleiche Abstände werden über Startkoordinaten, Inkremente in x- und y-Richtung und die Anzahl der Wiederholungen generiert. Variable Abstände werden über Startkoordinaten und durch Angabe der Abstände als Zeichenfolge mit Semikolon getrennt (z.B. 2;5;7) generiert. Das Netz wird mit eindeutigen Knotenidentifikatoren generiert und erst nur tabellarisch dargestellt. Diese werden dann mit der Bestätigung “**Ok**” in das Modell übernommen.

Zusätzlich zu den Menüoptionen stehen auch interaktive Funktionen zum Editieren von Knoten zur Verfügung. Ein Linksklick auf einen Knotenidentifikator oder ein Knotensymbol (kleiner Kreis) öffnet einen Benutzerdialog mit den aktuellen Knotenwerten (Id, Anzahl Freiheitsgrade und Koordinaten). Zudem erscheint eine Tabelle mit den bereits bestehenden Knotenidentifikatoren und an der Position des gewählten Knoten erscheint ein roter „Pilotpunkt“. Wird der Zeiger auf diesen Pilotpunkt bewegt, rechts gedrückt und gehalten, so kann dieser mit dem Zeiger (langsam) bewegt werden. Die kontinuierlich aktualisierten Koordinaten werden im zugehörigen Benutzerdialog angezeigt. Dieser Vorgang wird mit einem Rechtsklick beendet. Die daraus resultierenden Knotenkoordinaten können im Benutzerdialog weiter editiert und schließlich mit **Ok** akzeptiert werden oder eine Knotendefinition kann komplett gelöscht werden. Der resultierende Modellzustand wird unmittelbar neu dargestellt.

**Element neu, editieren, löschen**

Die Menüauswahl Elemente hat drei Unterauswahlmöglichkeiten:

* **Element,**
* **Querschnitt und**
* **Material**

**Element** öffnet den Benutzerdialog für ein Element. Elementidentifikatoren können generiert werden oder durch Linksclick im Feld „Element ID“ eingegeben werden. Im letzteren Fall öffnet sich eine Tabelle mit bereits bestehenden Elementidentifikatoren, um die Eingabe einer neuen. Eindeutigen ID zu unterstützen. Durch Eingabe eines bereits bestehenden Elementidentifikators werden die aktuellen Werte des zugehörigen Elements dargestellt und diese können akzeptiert oder editiert werden. Außerdem kann ein bestehendes Modellelement gelöscht werden.

Ein Linksklick auf einen Elementidentifikator oder auf die grafische Darstellung eines Elementes öffnet einen Dialog mit den aktuellen Elementwerten (ID, Typ, Startknoten ID, Endknoten ID, Material ID, E-Modul, spez. Masse, Querschnitt ID, Querschnittsfläche und Trägheitsmoment). Zudem erscheint eine Tabelle mit den bereits bestehenden Elementidentifikatoren. Material- und Querschnittswerte werden in der Regel über Material ID und Querschnitt ID zugeordnet. Der Verweis über solche „Gruppen“identifikatoren erlaubt die Festlegung mehrerer Materialwerte (z.B. E-Modul, spez. Masse) und mehrerer Querschnittwerte (z.B. Querschnittfläche und Trägheitsmoment) zu einer ganzen Gruppe von Elementen. Wird hingegen im Benutzerdialog ein bestimmter Wert für einzelne Elementwerte (z.B. E-Modul, spez. Masse, Querschnittsfläche, Trägheitsmoment) für ein spezifisches Element festgelegt, so haben diese einzelnen Elementwerte Vorrang vor den Gruppenverweisen und werden für die Berechnung genutzt.

Im Benutzerdialog können also entweder die Gruppen-IDs festgelegt werden oder die Einzelwerte. Werden beide festgelegt, so hat der Einzelwert Vorrang. Im Benutzerdialog können die Knotenbezüge (Start-, Endknoten) interaktiv festgelegt werden. Wenn der Benutzerdialog aktiv ist, werden hierzu Knoten-IDs angeklickt und der erste Klick wird als neuer Startknoten interpretiert und der zweite als Endknoten. Beide werden umgehend im Benutzerdialog angezeigt.

Ähnlich können die Material- und Querschnittbezüge durch einen Klick auf einen anderen Elementidentifikator festgelegt werden, dessen Werte gelesen und für das neue Element übernommen werden.

Die Unterauswahlmöglichkeiten **Material** und **Querschnitt** öffnen jeweils einen Benutzerdialog zur Festlegung einer neuen Material bzw. Querschnitt ID mit den zugeordneten Gruppenwerten. Wird in diesen beiden Dialogen ein Identifikator für eine schon vorhandene Modelldefinition eingegeben, werden die Daten, die mit der Modelldefinition verbunden sind, angezeigt und können nach Belieben editiert werden. Eine nutzerdefinierte Neueingabe einer eindeutigen ID (z.B. Material ID) wird erleichtert durch die Anzeige aller vorhandenen, bereits vergebenen IDs in einem eigenen Informationsfenster. Wird **kein** Textidentifikator eingegeben, wird ein neuer eindeutiger Identifikator aus zugeordneten Identifikatoren generiert.

Zusätzlich zu Modellveränderungen über die Menüauswahl können vorhandene Textidentifikatoren auch direkt angewählt werden. Daraufhin öffnet sich jeweils ein entsprechendes Dialogfenster zur Festlegung bzw. Änderung der Daten der angewählten Modelldefinition.

Beispielhaft soll dies an der Eingabe eines neuen Balkenelementes gezeigt werden.

| Eindeutige Identifikatoren können entweder eingegeben oder generiert werden.  Gelenke können am Anfang und Ende von Biegebalkenelementen definiert werden.  Elementknoten können mit Zeiger-Click identifiziert werden.  Material- und Querschnittswerte können per Zeiger-Click auf bestehende Elemente übernommen werden.  In der Regel werden diese über Material-, Querschnitt-ID als Gruppe zugeordnet.  Direkteingabe einzelner Werte (z.B. Emodul, Masse, Fläche, Trägheitsmoment) hat aber für einzelne Elemente Präferenz gegenüber einer Gruppenzuordnung, |  |
| --- | --- |

Die einfachste und schnellste Option zur Definition eines neues Balkenelementes ist

* die Festlegung des Elementtyps mit oder ohne Gelenken
* anclicken zweier Knoten-Ids für Start- und Endknoten  
  Element-Id wird generiert aus Knoten-Ids
* anclicken einer bestehenden Element-Id zur Übernahme von Material- und Querschnittswerten

**Lasten neu definieren, editieren, löschen**

Die Menüauswahl **Lasten** hat drei Unterauswahlmöglichkeiten:

* **Knotenlast**,
* **Linienlast** und
* **Punktlast**

Diese öffnen jeweils einen Benutzerdialog zur Festlegung der Werte des jeweiligen, neuen Lasttyps oder zum Löschen einer Last.

Im Benutzerdialog **Knotenlast** kann der zugehörige Knoten durch einen Linksklick auf einen Knotenidentifikator definiert werden. Der Knotenlastidentifikator wird dann generiert.

In den Benutzerdialogen **Linienlast** und **Punktlast** kann das zugehörige Element durch einen Linksklick auf einen Elementidentifikator definiert werden. Die Lastidentifikatoren werden dann jeweils generiert, können aber auch vom Nutzer festgelegt werden.

Aktiviert der Nutzer das Feld für die Eingabe einer Last-Id, öffnet sich ein Fenster mit allen bereits genutzten Last-Ids zur Erleicherung der Eingabe einer neuen, eindeutigen Last-Id. Die Eingabe einer bestehenden Id öffnet deren Werte.

Alternativ können auch bereits vorhandene Last-Ids angeclickt werden, um deren Definitionswerte zu ändern.

**Lager neu, editieren, löschen**

Die Auswahl **Lager** öffnet einen Benutzerdialog zur Festlegung der Werte eines neuen Lagers oder zum Löschen eines Lagers.

Im Benutzerdialog **Lager** kann der zugehörige Knoten durch einen Linksklick auf einen Knotenidentifikator definiert werden. Der Lageridentifikator wird dann generiert.

Aktiviert der Nutzer das Feld für die Eingabe einer Lager-Id, öffnet sich ein Fenster mit allen bereits genutzten Lager-Ids zur Erleicherung der Eingabe einer neuen, eindeutigen Lager-Id. Die Eingabe einer bestehenden Id öffnet deren Werte.

Alternativ können auch bereits vorhandene Lager-Ids angeclickt werden, um deren Definitionswerte zu ändern.

Als Beispiel soll eine Modellveränderung durch ein zusätzliches diagonales Fachwerkelement in einemZweifeldrahmen gezeigt werden.

|  |  |
| --- | --- |

Für den neuen Stab wird die Auswahl „Elemente“ Unterauswahl „Element“ ausgewählt. Daraufhin öffnet sich das Dialogfenster zur Neudefinition eines Elementes. Als Elementtyp wird „Fachwerkstab“ gewählt. Dann werden im Fenster „Tragwerksmodell visualisieren“ zwei Knotenidentifikatoren angewählt für den Start- und den Endknoten des Fachwerkstabs. Der eindeutige Elementidentifikator „e13“ wird aus den Identifikatoren von Anfangs- und Endknoten generiert und im Dialog dargestellt. Für die Material- und Querschnittsdefinition kann ein vorhandener Elementidentifikator angewählt werden, woraufhin dessen Material- und Querschnittsdefinitionen übernommen und im Dialog dargestellt werden.

Jede Neudefinition oder Veränderung einer Modelldefinition führt unmittelbar zu einer Neudarstellung der geänderten Modelldarstellung im Fenster „Tragwerksmodell visualisieren“.

Anschließend kann nach Bedarf eine „statische Berechnung“ durchgeführt werden. Nach jeder Berechnung werden die Ergebnisse in einem neuen Fenster visualisiert. Die unterschiedlichen Ergebnisse der jeweiligen Berechnung unterschiedlicher Modellzustände in neuen Fenstern „Statik Ergebnisse visualisieren“ bleiben erhalten und können verglichen werden.

|  |  |
| --- | --- |

Durch Anclicken der Element-Id des Fachwerkstabs wurde der Elementdialog geöffnet und die Werte für E-Modul und Querschnittsfläche erhöht, woraus sich eine Kraftumlagerung ergab und eine geringere Horizantalverschiebung.

|  |  |
| --- | --- |

Alle Änderungen in diesem Dialog werden unmittelbar in das Modell übernommen und stehen direkt für eine Neuberechnung zur Verfügung. Die Ergebnisse unterschiedlicher Berechnungen können in separaten Fenstern verglichen werden.

Die Auswahl **Dynamik** im Auswahlmenü bzw. **dynamische Berechnung** im Aufklappmenü der Anwendung wird nur für die Durchführung einer dynamischen Zeitverlaufsberechnung benötigt. Sie öffnet einen Benutzerdialog zur Eingabe der Parameter für eine dynamische Zeitverlaufsberechnung des Tragwerks.

Drei unterschiedliche Lösungsmethoden stehen für die Zeitintegration zur Verfügung. Das Newmark Verfahren mit den Parametern β und γ, das Wilson θ-Verfahren mit dem Parameter θ und das α-Verfahren mit dem Parameter α.

| Häufig sind die modalen Dämpfungsmaße für alle Eigenformen gleich.  Dies erfolgt durch Eingabe „alle“ im Eingabefeld „Eigenform“.  Unterschiedliche Dämpfungs-maße können für jede Eigenform separat festgelegt und traversiert werden.  3 alternative Zeitschrittverfahren werden angeboten und deren jeweilige Parameter nach Stabilitäts-kriterien vorgeschlagen.  Die Größe des Zeitschritts wird in Abhängigkeit der kleinsten Periode der Eigenlösung vorgeschlagen.  Die optionale Anzahl von Anfangsbedingungen kann festgelegt werden und schrittweise für einzelne Knoten bestimmt werden. |  |
| --- | --- |

Diese beinhalten die Definition der

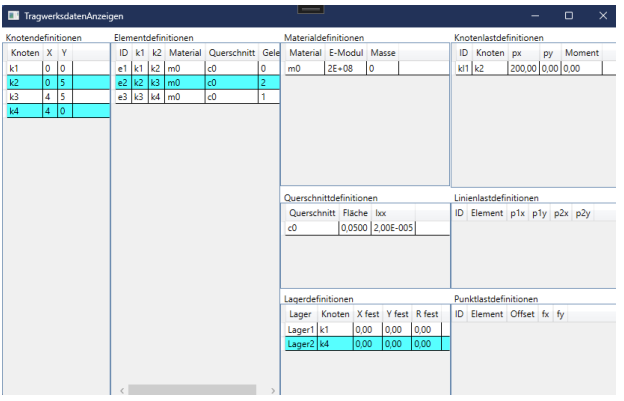
* Gesamtzeit des Zeitverlaufs,
* Anzahl der Eigenlösungen, die berechnet und berücksichtigt werden sollen,
* ggf. modale Dämpfungsmaße,
* die Auswahl und Parameter für ein bestimmtes Lösungsverfahren,
* die Länge des Zeitschritts Δt für die Gesamtdauer der Lösung und
* ggf. vorbestimmte Anfangsbedingungen

Das Startmenü einer Anwendung bietet den **komplette Funktionsumfang**

* das Einlesen neuer, Editieren vorhandener und Sichern aktueller Modelldaten. Eine Textdatei mit den beschreibenden Modelldefinitionen kann aus dem Unterverzeichnis des jeweiligen Themengebietes (z.B. /FE-Berechnungen/input/Tragwerksberechnung) eingelesen, editiert oder gesichert werden. Nach erfolgreichem Einlesen werden die eingelesenen Modelldaten zur Kontrolle quittiert,
* die tabellarische Anzeige oder grafische Visualisierung der aktuellen Modelldaten,
* die Berechnung, Anzeige und Visualisierung der Ergebnisse,
* die Dateneigabe, Visualisierung und Berechnung zeitabhängiger Modellzustände,
* die Berechnung, Anzeige und Visualisierung von Eigenlösungen und
* die Anzeige und Visualisierung der Ergebnisse einer zeitabhängigen Berechnung.

ich und ergänzend zur grafischen Darstellung eines Modells und der Berechnungsergebnisse wird auch eine **tabellarische Darstellung der Modelldaten und der Berechnungsergebnisse** unterstützt.

Die tabellarische, alphanumerische Anzeige eines spezifischen Tragwerksmodells erfolgt in einem separaten Fenster.



Jedes Objekt einer Modelldefinition ist durch einen eindeutigen Textidentifikator gekennzeichnet und adressierbar (z.B. Knoten k1, k2, k3, k4 oder Elemente e1, e2, e3). Bezüge auf andere Modelldefinitionen werden ausschließlich über deren Identifikator hergestellt (z.B. Element e1 auf Knoten k1, k2). Das Gleiche gilt für Material- und Querschnittsdefinitionen (z.B. m0, c0), die je nach Themengebiet unterschiedliche Inhalte beinhalten können (hier z.B. E-Modul und Masse, bzw. Fläche und Trägheitsmoment).

Auch die Benutzeroberfläche der tabellarischen Darstellung ist in begrenztem Umfang interaktiv gestaltet. Modelldefinitionen können editiert werden, neue Definitionen können hinzugefügt werden und bestehende können gelöscht werden.

Jede Zeile in einer Ausgabetabelle kann angewählt und markiert werden. Angewählte Tabellenzeilen können dann z.B. komplett gelöscht werden, womit zugleich auch die zugehörigen Informationen im Modell gelöscht werden. Es ist aber auch möglich einzelne Zellen einer angewählten Tabellenzeile anzuwählen und deren Inhalt zu editieren. So können z.B. Knotenkoordinaten editiert werden, um die Modellgeometrie zu verändern, oder es können ganze Knoten oder Elemente aus dem Modell gelöscht werden, um direkt anschließend das geänderte Modell neu berechnen zu können und dessen geändertes Verhalten beurteilen zu können.

Zusätzliche, neue Modelldaten (Knoten, Elemente, Material, Lasten und Lager) können durch einen Doppelklick in einer entsprechenden Tabelle initiiert werden. Es öffnet sich dann ein entsprechender Nutzerdialog zur Festlegung der zugehörigen, erforderlichen Modelldaten. Das Modell wird dann entsprechend erweitert.

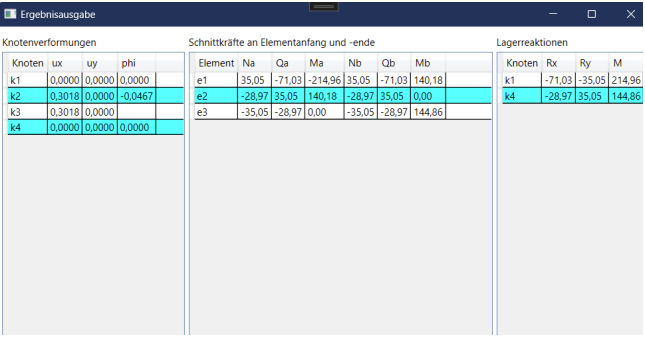
**Beurteilung der Berechnungsergebnisse:**

Eine zweite Grundintention dieser Software ist die **interaktive Ergebnisexploration**. Zu diesem Zweck werden die wesentlichen Ergebnisse einer Berechnung wieder in **tabellarischer Form** dargestellt und können unabhängig davon oder parallel dazu in visueller Form veranschaulicht werden.

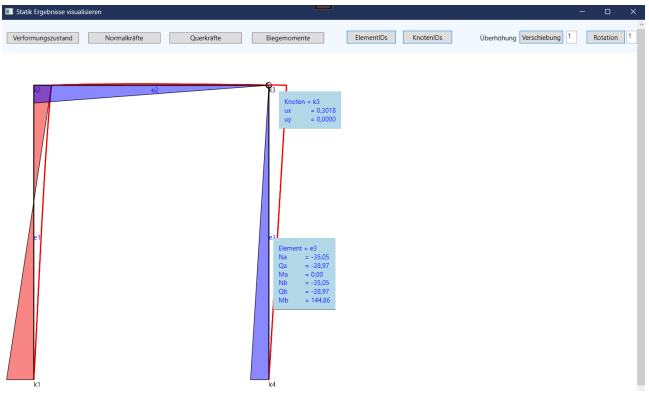
Die Hauptergebnisse einer Berechnung sind die primalen Variablen (z.B. Knotentemperaturen oder Knotenverformungen) und die dualen Variablen (Reaktionen an vordefinierten Randbedingungen, z.B. Lager). Für die Beurteilung des Modellverhaltens sind jedoch in der Regel weitere, abgeleitete Ergebnisse von wesentlicher Bedeutung. Dies sind z.B. der Wärmefluss oder die Elementschnittkräfte. Diese werden berechnet und können tabellarisch oder visuell dargestellt werden.

Die **visuelle Darstellung** der Ergebnisse einer Berechnung beinhaltet zum einen die grafische Darstellung der primalen Ergebnisse (Modellverformungen bzw. -temperaturen), der dualen Ergebnisse (Wärmefluss bzw. Lagerrektionen) und zum anderen eine grafische Darstellung abgeleiteter Ergebnisse wie z.B. Schnittkraftverläufe oder Wärmefluss.

Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse erlaubt eine schnelle Gesamtübersicht über die relative Größe der Ergebnisse.

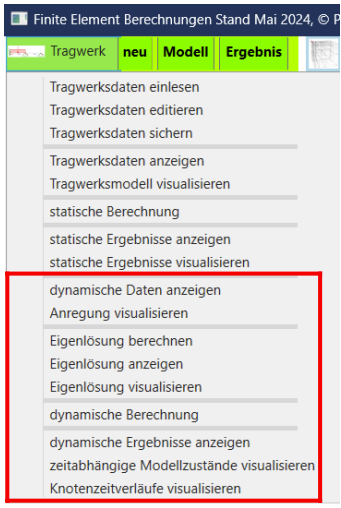


**Statik Ergebnisse visualisieren** hilft die Lokalisierung und Verteilung der Ergebnisse zu veranschaulichen. Sie wird unterstützt durch Popup-Fenster, die nach Linksklick auf Textidentifikatoren und Grafikelemente aufklappen und Detailinformationen zu Ergebnissen an diesen Elementen anzeigen. Mit einem Rechtsklick wird das Fenster wieder geschlossen.



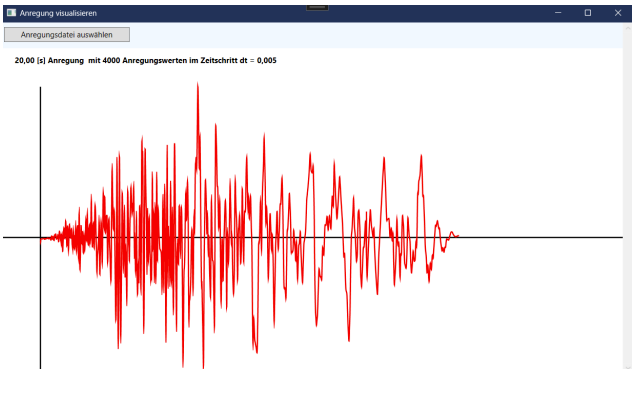
Die Darstellung unterstützt die Darstellung des Verformungszustandes (rot) und der Schnittkräfte (hier Biegemomente). Elemente IDs und Knoten IDs können an- und abgeschaltet werden. Die Darstellung der Verformungen kann für eine bessere Veranschaulichung um einen benutzerdefinierten Faktor für Verschiebung und Rotation überhöht werden,

Eine **dynamische Berechnung** ist wesentlich aufwändiger. Die wesentlichen Funktionalitäten sind über das Aufklappmenü des Themengebietes verfügbar und umfassen die Anzeige und das Editieren der Eingabedaten für die dynamische Berechnung, Die Visualisierung der dynamischen Anregung, die Berechnung, Anzeige und Visualisierung der Eigenlösungen, den expliziten Start der dynamischen Berechnung und schließlich die Berechnungsergebnisse in Form einer alphanumerische Anzeige, der Visualisierung der zeitabhängigen Modellzustände und der Visualisierung der Knotenzeitverläufe.



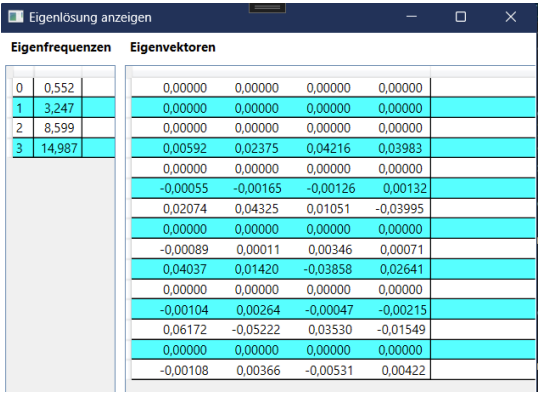
| Im folgenden Beispiel der dynamischen Berechnung eines Industriekamins sollen 4 Eigenlösungen berücksichtigt werden und die Berechnung über eine Gesamtdauer von 30s mit einem Zeitintervall von 0,005s erfolgen. Als Lösungsverfahren soll das Newmark-Verfahren mit den Integrationsparametern 0,25 und 0,5 genutzt werden.  Knotenanfangswerte sollen nicht definiert werden und die Anregung soll eine zeitabhängige Knotenlast als Bodenanregung am Freiheitsgrad 0 sein, deren Werte aus einer Datei gelesen werden. Ein modales Dämpfungsmaß soll 2% für alle Eigenlösungen betragen. |  |
| --- | --- |

Die Anregungsfunktion wird aus einer Datei gelesen. Beispiele sind im Verzeichnis FE-Berechnungen/input/Tragwerksberechnung/Dynamik/Anregungsdatei.



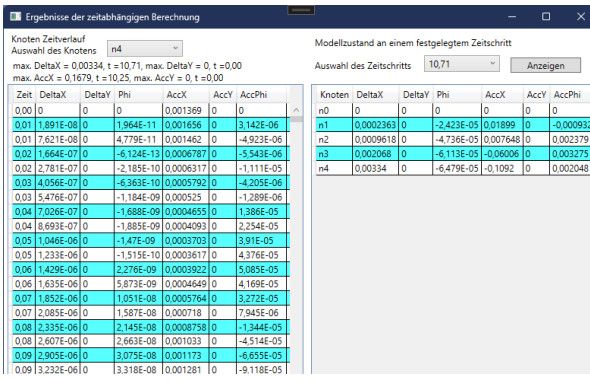
Hier wird die Bodenbeschleunigung an einem Beschleunigungsmesser des El Centro Erdbebens von 1940 über eine Zeitdauer von 20 Sekunden in Zeitschritten von 0,005 Sekunden dargestellt.

Es sollen **4 Eigenlösungen** berechnet und alphanumerisch angezeigt werden.



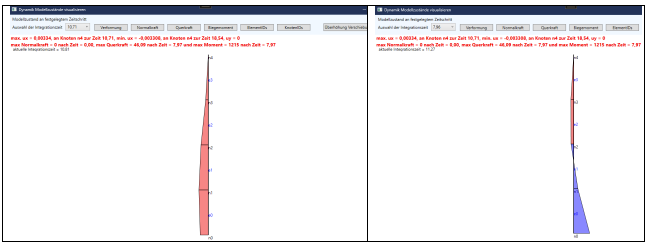
**Ergebnisse der zeitabhängigen Berechnung** in alphanumerischer Form. Nach Auswahl eines Knotens werden dessen Verformungen (Delta) und Beschleunigungen (Acc) an allen Freiheitsgraden und allen Zeitschritten angezeigt. Die Maximalwerte werden ermittelt und in der Überschrift als Text ausgegeben.

Nach Auswahl eines Zeitschritts wird der Modellzustand an allen Knoten zu diesem Zeitschritt angezeigt.



**Zeitabhängige Modellzustände** können für ausgewählte Zeitschritte **visualisiert** werden. Hierzu wird der gewünschte Zeitschritt ausgewählt und die Zustandsgrößen an diesem Zeitschritt visualisiert.

Es werden die Maximalwerte über den gesamten Zeitverlauf als Text ausgegeben mit dem Zeitpunkt ihres Auftretens.



Hier wird die Verteilung des Biegemomentes an 2 verschiedenen Zeitschritten dargestellt. Wird die Auswahl einer Zustandsgröße mehrfach angeklickt, so wird der Zeitschritt kontinuierlich weitergezählt.

Schließlich können noch die Knotenzeitverläufe der Verformungen und Beschleunigungen für einen ausgewählten Knoten visualisiert werden. Der Maximalwert wird als Text mit dem Zeitpunkt seines Auftretens angezeigt.



Hier wird die Verformung des Knotens „n4“ in X-Richtung über den gesamten Zeitverlauf visualisiert.