**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.

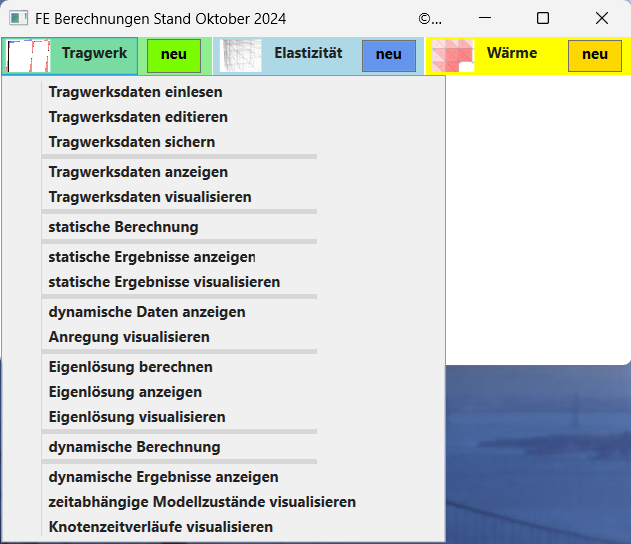
Tragwerksberechnungen sind in der Regel ein spezieller Fall allgemeiner Festigkeitsberechnungen, die aus der Elastizitätstheorie abgeleitet werden und sie werden daher in der Praxis häufig zusammen behandelt. Der allgemeinere Fall der **Elastizitätsberechnung** wird in der Ausbildung aber häufig erst 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.

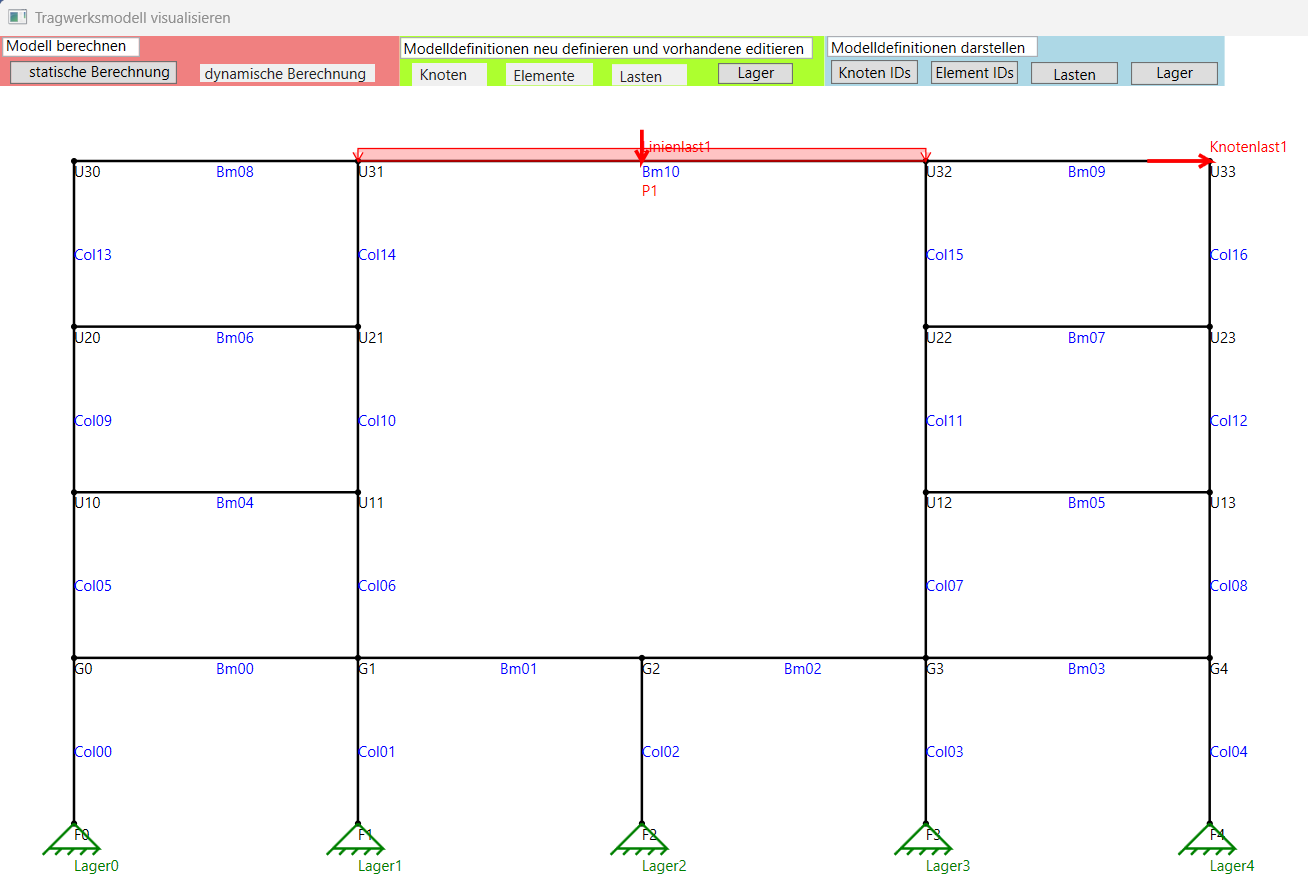
„Leere“ Eingabedateien mit auskommentierten Schablonen als Beispiele für die jeweils unterstützten Arten von Eingabezeilen stehen in Dateien „Vorlage.inp“ zur Verfügung.

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).



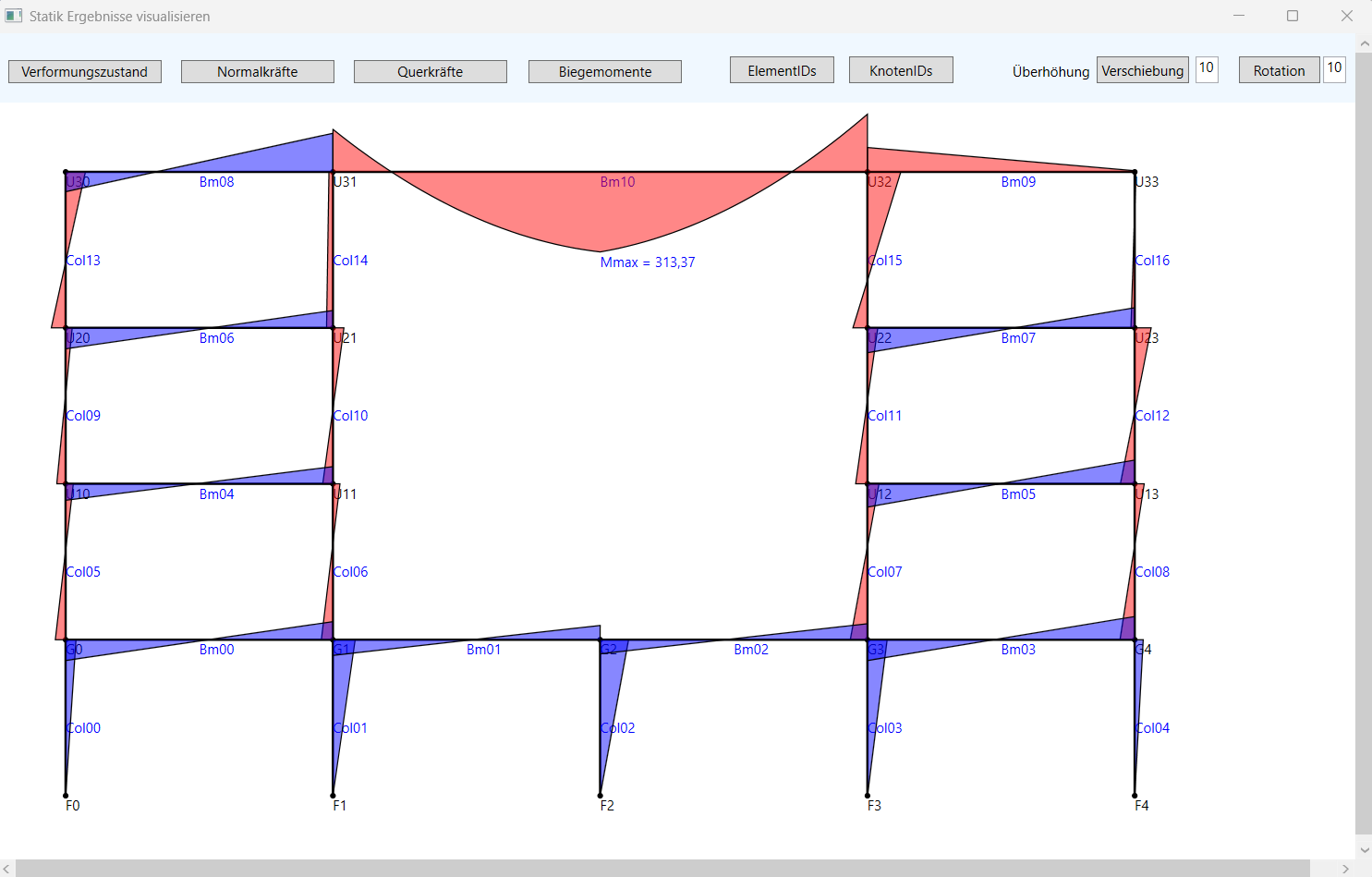
Jedes Themengebiet (Tragwerksberechnung, Elastizitätsberechnung, Wärme-berechnung) ist durch eine Menüauswahl anwählbar, die jeweils den kompletten Funktionsumfang für das spezifische Themengebiet zur Verfügung stellt (hier: Tragwerksberechnung). Zusätzlich gibt es für jedes Themengebiet die Menüauswahl „**neu**“, die Eingabedaten für eine neue Modelldefinition aus vordefinierten Beispieldaten im Unterverzeichnis „input“ anbietet.

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

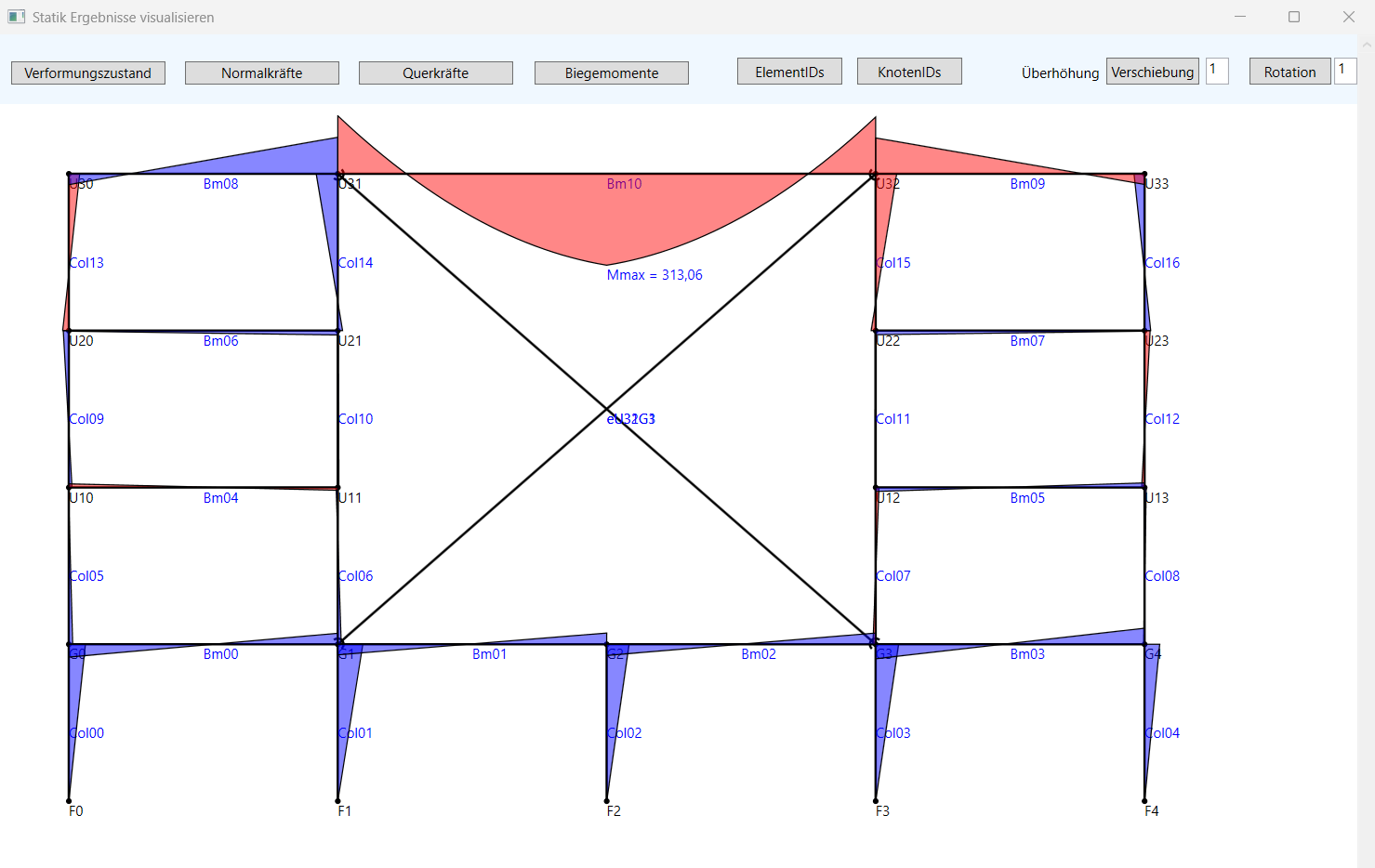


hier z.B. die Darstellung eines Gebäudemodells, das im Unterverzeichnis „input“ zur Verfügung steht.

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 zu interaktiven Modellveränderungen, die zu einer unmittelbaren Neuberechnung und Visualisierung der entsprechenden Ergebnisse in einem neuen Fenster führen.



Neue Modelldefinitionen können über das Menü im Fenster „Tragwerksmodell visualisieren“ veranlasst werden. Auswahlmöglichkeiten sind „Knoten“, „Elemente“, „Lasten“ und „Lager“.

Für jede Auswahl wird ein entsprechendes Dialogfenster für die jeweilige gewählte Auswahl geöffnet. Eindeutige Identifikatoren können entweder eingegeben oder generiert werden.

Wird ein Identifikator für eine schon vorhandene Modelldefinition eingegeben, werden die Daten, die mit der Modelldefinition verbunden sind, angezeigt und können nach Belieben editiert werden.

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.

Innerhalb der unterschiedlichen Dialogfenster stehen wiederum interaktive Funktionalitäten zur Verfügung, um die Dialoge auszufüllen, z.B. durch interaktive Auswahl eines vorhandenen Identifikators.

Als Beispiel soll eine Modellveränderung durch 2 zusätzliche diagonale Fachwerkstäbe im obigen Modell gezeigt werden. Für jeden neuen Stab wird in der Auswahl „Element“ ein neues Element ausgewählt. Daraufhin öffnet sich jeweils ein Dialogfenster zur Neudefinition eines Elementes. Wird dann im Fenster „Tragwerksmodell definieren“ ein Knotenidentifikator angewählt, so wird der erste dem Anfangs- und der zweite dem Endknoten des neuen Stabes zugeordnet und im Dialog eingetragen. Der eindeutige Elementidentifikator wird aus den Identifikatoren von Anfangs- und Endknoten generiert und im Dialog dargestellt. Zur Material- und Querschnittsdefinition kann ein vorhandener Elementidentifikator angewählt werden, woraufhin dessen Material- und Querschnittsdefinitionen übernommen und im Dialog dargestellt werden.

In der Regel werden Material und Querschnitt ID für eine ganze Gruppe von Elementen festgelegt und bezeichnen Elastizitätsmodul und spezifische Masse sowie Querscnittsfläche und Trägheitsmoment für eine gesamte Gruppe von Elementen. Werden diese Werte jedoch spezifisch für ein bestimmtes Element festgelegt oder geändert, so haben die spezifischen Elementdefinitionen Vorrang vor den Definitionen einer Gruppenzuordnung.

Durch Auswahl von „OK“ wird das neue Element erzeugt.

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

Anschließend kann je 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.

Die Dialogfenster zur Neudefinition oder zum Editieren von Modellkomponenten enthalten oftmals Hinweise zu interaktiven Eingabefunktionalitäten. Das Dialogfenster für ein neues Element weist z.B. darauf hin, daß die Element ID „generiert aus Start- und Endknoten ID“ generiert werden kann, daß die Start- und Endknoten ID durch „click auf eine vorhandene Knoten ID“ festgelegt weren kann und daß Material- und Querschnittswerte durch „click auf eine vorhandene Element ID“ bestimmt werden können.

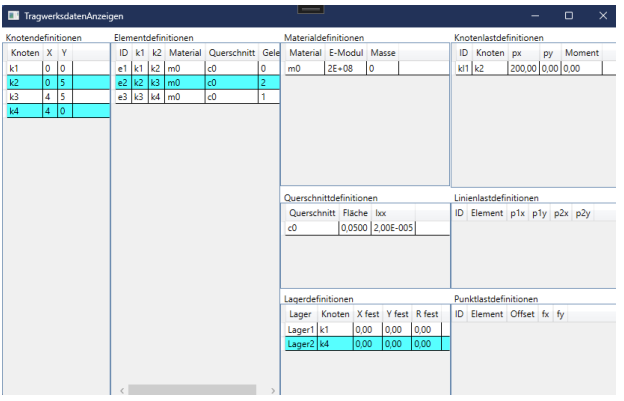
Entsprechende Hinweise finden sich in etlichen Eingabedialogen.

Manchmal wird die Eingabe einer eindeutigen ID (z.B. Element ID) erleichtert durch die Anzeige aller vorhandenen, bereits vergebenen IDs in einem eigenen Informationsfenster.

Der komplette Funktionsumfang des jeweiligen Startmenüs ist unterteilt in

* 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.

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.

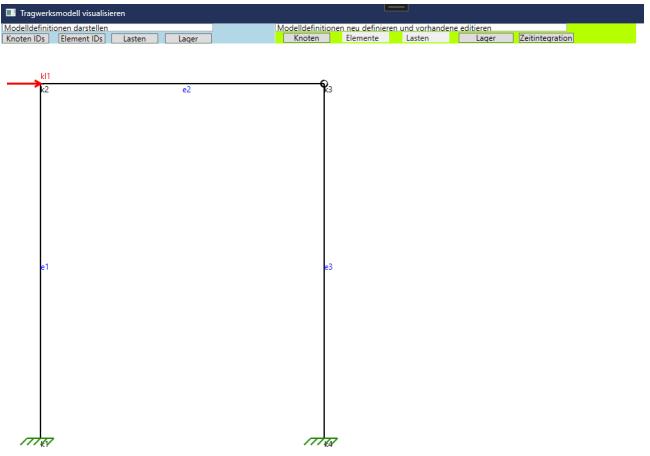
Jede Zeile in einer Ausgabetabelle kann angewählt und markiert werden. Angewählte Tabellenzeilen können dann z.B. komplett gelöscht werden, womit zugleich auch die zugehörigen Informationen im Modell gelöscht werden. Es ist aber auch möglich einzelne Zellen einer angewählten Tabellenzeile anzuwählen 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.

Durch die Auswahl **Modell** wird der Zustand der aktuellen Modelldefinition in einem neuen Fenster grafisch dargestellt (**Tragwerksmodell visualisieren**) und ein **Auswahlmenü** für die **Modellvisualisierung** und **Modifikation von Modelldefinitionen** angeboten. Das Auswahlmenü und die Darstellung sind wesentliche Grundlage für **interaktive Modellveränderungen** und für die **interaktive Erstellung von Modellvarianten**.

Durch die Auswahl **Ergebnis** wird der resultierende Modellzustand neu berechnet und dargestellt.

Das Fenster für die **Modellvisualisierung**, welches durch die Auswahl “Modell” geöffnet wird, besteht aus einem Auswahlmenü und einem Zeichenbereich.



Das **Auswahlmenü** ist unterteilt **Modelldefinitionen darstellen** und **Modelldefinitionen neu definieren und vorhandene editieren**.

**Modelldefinitionen darstellen** dient zum An- und Abschalten der Darstellung von Knotenidentifikatoren, Elementidentifikatoren sowie von Lasten- und Lagerdarstellungen.

**Modelldefinitionen neu definieren und vorhandene editieren** öffnet jeweils einen Benutzerdialog für einen Knoten, ein Element, eine Last oder ein Lager. Zudem können die Parameter eines Lösungsverfahren für eine zeitabhängiges Berechnungsverfahren eines Modells definiert oder verändert werden.

Zusätzlich zu den jeweiligen Benutzerdialogen der angewählten Modellelemente wird jeweils auch eine Tabelle geöffnet mit der Anzeige aller vorhandenen, schon definierten Identifikatoren des gewählten Modellelementes und deren Inhalten, sodass die Eingabe neuer, eindeutiger Identifikatoren erleichtert wird.

Vielfache Funktionalitäten für die Ergänzung und Veränderung eines vorhandenen Modells ergeben sich aus verschiedenen interaktiven Möglichkeiten der Aktivierung von Bestandteilen der grafischen Darstellung eines vorhandenen Modells. Ein Linksklick auf einen Textidentifikator oder auf die grafische Repräsentation einer Modelldefinition (Element, Last, Lager) öffnet z.B. einen Benutzerdialog mit den aktuellen Werten der zugehörigen Modelldefinition. Diese Werte können akzeptiert, editiert oder gelöscht werden. Ebenso kann die zugehörige Modelldefinition komplett gelöscht (aus dem Modell entfernt) werden.

**Knoten neu, editieren, löschen**

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

* Knoten
* Knotengruppe
* äquidistantes Knotennetz
* Variables Knotennetz

Die Auswahl **Knoten** öffnet einen leeren Benutzerdialog für einen Knoten und eine Tabelle mit bereits bestehenden Knotenidentifikatoren.

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 Auswahl “**äquidistantes Knotennetz**” und “**variables Knotennetz**” öffnet 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 einen leeren Benutzerdialog für ein Element und eine Tabelle mit bereits bestehenden Knotenidentifikatoren. Diese Werte können für die Definition eines neuen Elementes ausgefüllt werden. 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 eines neuen Textidentifikators mit den zugeordneten Gruppenwerten.

Die Festlegung eindeutiger Identifikatoren für neue Modellelemente wird häufig dadurch erleichtert, dass diese aus vorhandenen Identifikatoren generiert werden. So wird z.B. bei der Eingabe der Daten für ein neues Element der eindeutige Elementidentifikator aus den Identifikatoren beteiligter Modellelemente generiert.

Beispielhaft soll dies an der Eingabe eines neuen Balkenelementes gezeigt werden. Nachdem der entsprechende Benutzerdialog für ein neues Balkenelement geöffnet wurde, kann durch Linksclick auf einen vorhandenen Knoten, dieser als Startknoten des Balkenelementes festgelegt werden und durch einen weiteren Linksclick auf einen anderen Knoten, dieser als Endknoten festgelegt werden. Der eindeutige Elementidentifikator wird aus den Identifikatoren von Start- und Endknoten generiert. Die Material- und Querschnittswerte des Balkenelementes können durch Linksclick auf ein anderes Balkenelement von diesem übernommen werden. Somit kann der Benutzerdialog durch drei interaktive Clicks vollkommen ausgefüllt werden und das entsprechende Element mit **Ok** in das Modell übernommen werden.

Anschließend erfolgt die unmittelbare Darstellung des resultierenden, neuen Modellzustands.

**Lasten neu, 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.

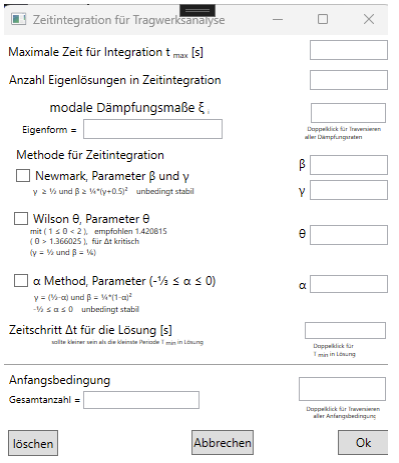
**Lager neu, editieren, löschen**

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

Die Auswahl **Zeitintegration** 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.



Diese beinhalten die Definition der

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

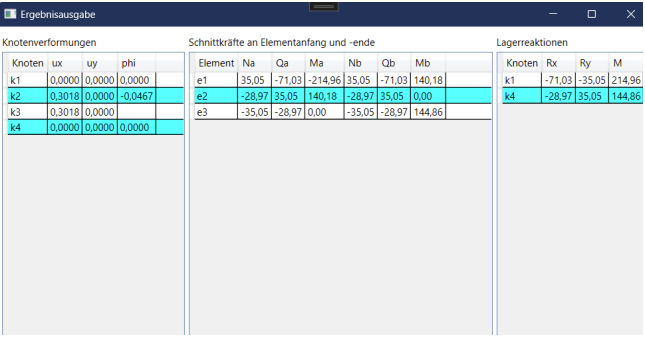
**Beurteilung der Berechnungsergebnisse:**

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.

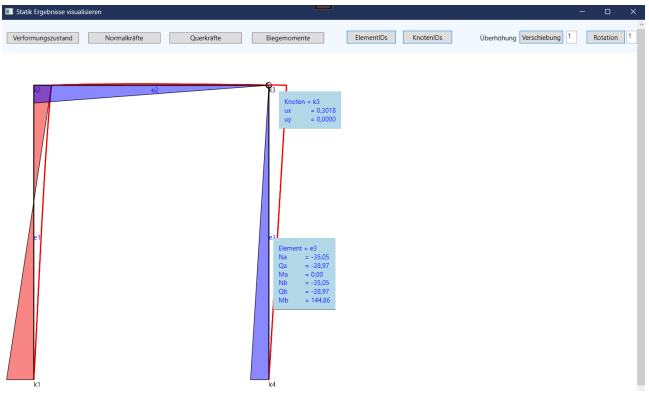
Die Hauptergebnisse einer Berechnung sind die primalen Variablen (z.B. Knotentemperaturen oder Knotenverformungen) und die dualen Variablen (Reaktionen an vordefinierten Randbedingungen, z.B. Lager). Für die Beurteilung des Modellverhaltens sind jedoch in der Regel weitere, abgeleitete Ergebnisse von 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.

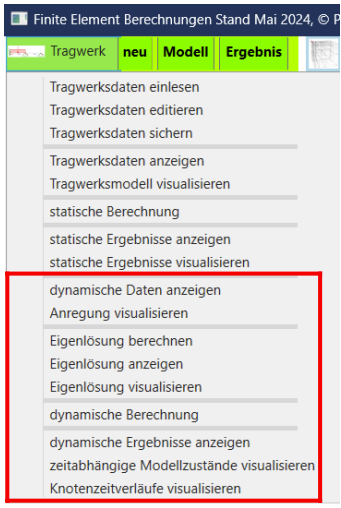


Die Darstellung unterstützt die Darstellung des Verformungszustandes (rot) und der Schnittkräfte (hier Biegemomente).

Elemente IDs und Knoten IDs können an- und abgeschaltet werden.

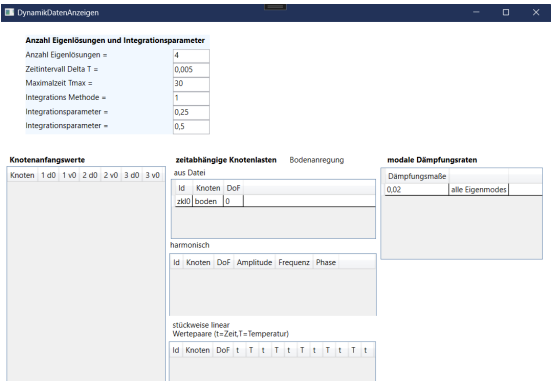
Die Darstellung der Verformungen kann für eine bessere Veranschaulichung um einen benutzerdefinierten Faktor für Verschiebung und Rotation überhöht werden,

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.

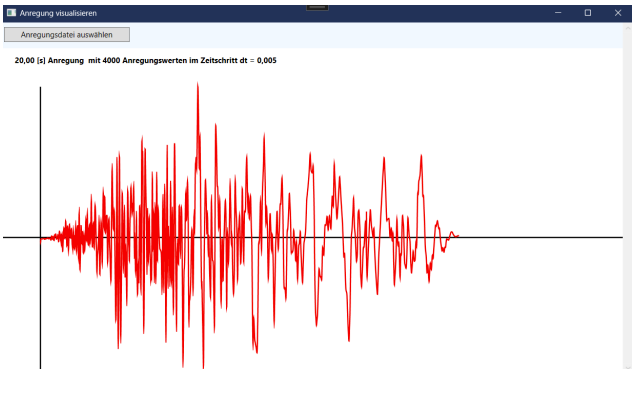


Im folgenden Beispiel der dynamischen Berechnung eines Industriekamins sollen 4 Eigenlösungen berücksichtigt werden und die Berechnung über eine Gesamtdauer von 30s mit einem Zeitintervall von 0,005s erfolgen. Als Lösungsverfahren soll das Newmark-Verfahren mit den Integrationsparametern 0,25 und 0,5 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.

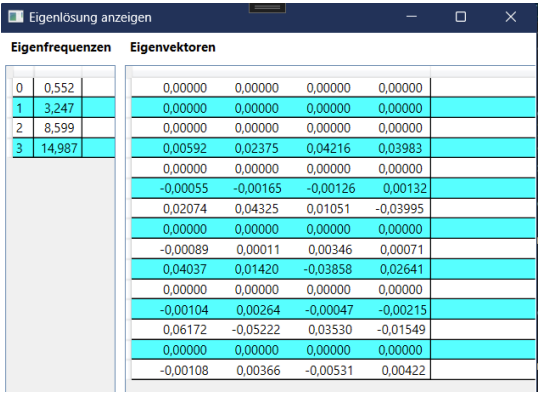


Die Anregungsfunktion wird aus einer Datei gelesen. Beispiele sind im Verzeichnis FE-Berechnungen/input/Tragwerksberechnung/Dynamik/Anregungsdatei.



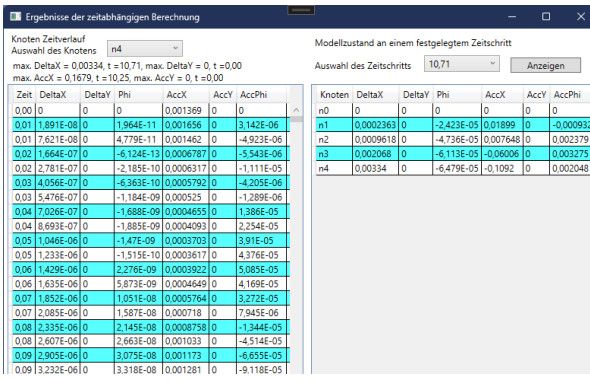
Hier wird die Bodenbeschleunigung an einem Beschleunigungsmesser des El Centro Erdbebens von 1940 über eine Zeitdauer von 20 Sekunden in Zeitschritten von 0,005 Sekunden dargestellt.

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



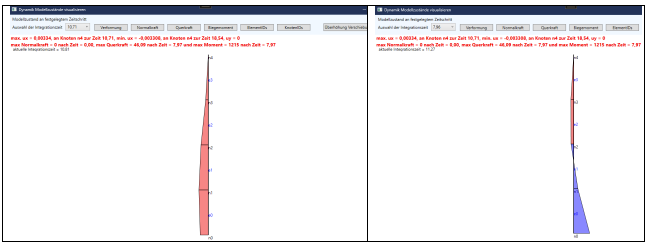
**Ergebnisse der zeitabhängigen Berechnung** in alphanumerischer Form. Nach Auswahl eines Knotens werden dessen Verformungen (Delta) und Beschleunigungen (Acc) an allen Freiheitsgraden und allen Zeitschritten angezeigt. Die Maximalwerte werden ermittelt und in der Überschrift als Text ausgegeben.

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.