

# Schwerpunkt: Berechnungsmethoden im Maschinenbau

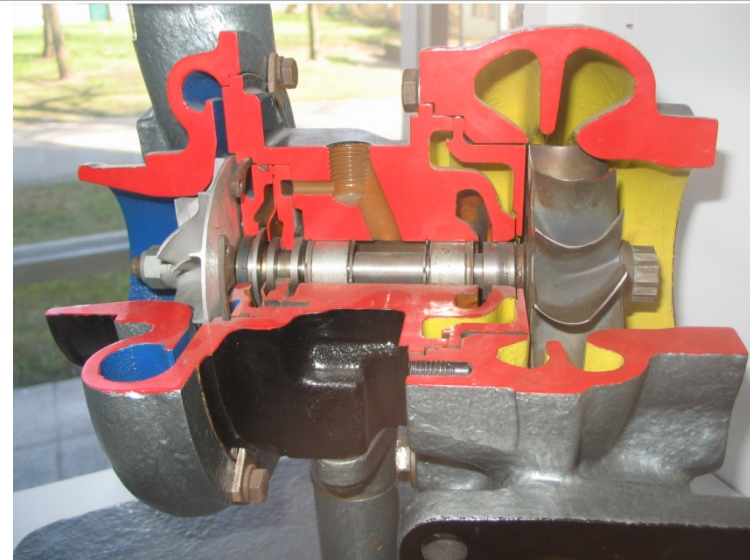
19.06.2013

Wolfgang Seemann

Institut für Technische Mechanik  
Fakultät für Maschinenbau

## Outline

1. Kernfächer
2. Ergänzungsfächer
3. Kurzvorstellung
4. Fragen



# Kernfächer und Wahlpflichtfächer

## Kernfächer (Wahlpflichtfach)

- **Angewandte Strömungsmechanik (2 SWS)**
- **Einführung in die Mehrkörperdynamik (3 SWS)**
- **Höhere Technische Festigkeitslehre (4 SWS)**

# Ergänzungsfächer

- **Atomistische Simulation und Molekulardynamik**
- **CAE-Workshop**
- **Computational Intelligence I**
- **Computational Intelligence II**
- **Computational Intelligence III**
- **Dynamik mechanischer Systeme mit tribologischen Kontakten**
- **Dynamik vom KFZ-Antriebsstrang**
- **Einführung in die Finite Elemente Methode**
- **Fluid-Festkörper-Wechselwirkung**
- **Konstruktiver Leichtbau**
- **Kontinuumsschwingungen**
- **Maschinendynamik**
- **Maschinendynamik II**
- **Mathematische Methoden der Dynamik**
- **Mathematische Methoden der Festigkeitslehre**
- **Mathematische Methoden der Schwingungslehre**

# Ergänzungsfächer

- **Mathematische Methoden der Strukturmechanik**
- **Methoden zur Analyse der motorischen Verbrennung**
- **Mikrostruktursimulation**
- **Modellierung und Simulation**
- **Nichtlineare Schwingungen**
- **Numerische Strömungsmechanik**
- **Plastizitätstheorie**
- **Rechnerunterstützte Mechanik I**
- **Rechnerunterstützte Mechanik II**
- **Schwingungstechnisches Praktikum**
- **Simulation gekoppelter Systeme**
- **Simulation im Produktentstehungsprozess**
- **Simulation von Spray- und Gemischbildungsprozessen in Verbrennungsmotoren**
- **Softwaretools der Mechatronik**
- **Stabilitätstheorie**

# Ergänzungsfächer

- **Technische Logistik I**
- **Technische Schwingungslehre**
- **Analytische Methoden in der Materialflussplanung**

# Angewandte Strömungsmechanik (2 SWS)

- Die Vorlesung ergänzt die strömungsmechanischen Grundlagen der Strömungslehrevorlesung. Der Student vertieft das Verständnis für Strömungsmechanische Phänomene. Die Vorlesung ist damit die Grundlage für ein Schwerpunktstudium Strömungslehre.
- Einführung Aerodynamik
- Grundlagen der Aerodynamik: Tragflügeltheorie, Grenzschichtströmungen, Transsonischer Tragflügel, Beispiellösungen
- Strömungen mit Wärmeübertragung: Grundlagen der Wärmeübertragung, Konvektion an der vertikalen Platte, Rayleigh-Benard Konvektion, Rohrströmung
- Bioströmungsmechanik: Grundlagen der Bioströmungsmechanik, Umströmungen von Lebewesen - Einzeller, Vogel, Fisch, Technische Anwendung, Blutkreislauf, Strömungen im Herzen

# Einführung in die Mehrkörperdynamik (3 SWS)

- Mechanismen, Fahrzeuge und Industrieroboter sind Beispiele für Mehrkörpersysteme. Zur Simulation des dynamischen Verhaltens werden Ausdrücke für kinematische Größen und Formulierungen für nichtlineare Bewegungsgleichungen benötigt, mit denen der Wechsel von einem System zu einem anderen leicht möglich ist. Die Vorlesung gibt eine Einführung in leistungsfähige Verfahren. Grundsätzlich beschreibt der erste Teil der Vorlesung die Kinematik, während der zweite Teil verschiedene Verfahren zum Herleiten von Bewegungsgleichungen behandelt.
- Mehrkörpersysteme und ihre technische Bedeutung
- Kinematik des einzelnen starren Körpers, Drehmatrizen, Winkelgeschwindigkeiten, Ableitungen in verschiedenen Bezugssystemen, Relativmechanik, holonome und nichtholonome Bindungsgleichungen für geschlossene kinematische Ketten
- Newton-Eulersche Gleichungen, Prinzip von d'Alembert, Prinzip der virtuellen Leistung, Lagrangesche Gleichungen, Kanescher Formalismus
- Struktur der Bewegungsgleichungen

# Technische Schwingungslehre (3 SWS)

- Grundbegriffe bei Schwingungen, Überlagerung von Schwingungen, komplexe Frequenzgangrechnung.
- Schwingungen für Systeme mit einem Freiheitsgrad: Freie ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen, Erzwungene Schwingungen für harmonische, periodische und beliebige Erregungen. Erregung ungedämpfter Systeme in Resonanz.
- Systeme mit mehreren Freiheitsgraden: Eigenwertproblem bei ungedämpften Schwingungen, Orthogonalität der Eigenvektoren, modale Entkopplung, Näherungsverfahren. Eigenwertproblem bei gedämpften Schwingungen. Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung, modale Entkopplung bei beliebiger Erregung, Schwingungstilgung.
- Schwingungen von Systemen mit verteilten Parametern: Beschreibende Differentialgleichungen, Wellenausbreitung, d'Alembertsche Lösung, Separationsansatz, Eigenwertproblem, unendlich viele Eigenwerte und Eigenfunktionen.
- Einführung in die Rotordynamik: Lavalrotor in starren und elastischen Lagern, Berücksichtigung innerer Dämpfung, Lavalrotor in anisotroper Lagerung, Gleich- und Gegenlauf, Rotoren mit unrunder Welle.



- Die Studierenden können die Methoden der höheren technischen Festigkeitslehre zielgerichtet und effektiv einsetzen. Speziell beherrschen die Studierenden die Beschreibung der Material- und Festigkeitseigenschaften von Werkstoffen, insbesondere die elastischen, die plastischen und die Verfestigungseigenschaften metallischer Werkstoffe. Die Studierenden können die Beschreibung des Versagens von Werkstoffen durch Schädigung oder Bruch anwenden. Die Studierenden haben die Grundlagen der Tragwerkstheorien verstanden.
  - Grundlagen der Tensorrechnung
  - Elastizitätstheorie
  - Anwendungen der Elastizitätstheorie: Linear elastische Bruchmechanik
  - Anwendungen der Elastizitätstheorie: Flächentragwerkstheorien
  - Plastizitätstheorie
  - Anwendungen der Plastizitätstheorie: Stabilität von Werkstoffen

- Die Studierenden kennen die Prinzipien und die Theorie der linearen Finite-Element-Methode. Sie beherrschen die grundlegenden Anwendungen der Finite-Element-Methode in der Festkörpermechanik und können die Formulierung sowie die numerische Lösung linearer zweidimensionaler Probleme angeben.
  - Numerische Lösung linearer Gleichungssysteme
  - Grundlagen und Randwertproblem der linearen Elastizitätstheorie
  - Lösungsmethoden für das Randwertproblem der linearen Elastizitätstheorie
  - Matrixverschiebungsmethode
  - Variationsprinzipien der linearen Elastizitätstheorie
  - Finite-Element-Technologie für lineare statische Probleme

- In der Vorlesung werden Prozesse und Maschinen der Technischen Logistik erklärt. Der grundsätzliche Aufbau und die Wirkungsweise werden intensiv behandelt. Bezug zu industriell eingesetzten Maschinen wird ständig hergestellt. Gastvorlesungen geben Einblick in ausgeführte Maschinen und Anlagen.
- Grundlagen
- Wirkmodell fördertechnischer Maschinen
- Elemente zur Orts- und Lageveränderung
- fördertechnische Prozesse
- Antriebe
- Betrieb fördertechnischer Maschinen
- Aufbau und Funktion ausgewählter fördertechnischer Maschinen (Aufzug, Kran, Regalförderzeuge, FTS, etc)

- Die Studierenden können die Methoden der Fuzzy-Logik und Fuzzy-Regelung zielgerichtet und effizient zur Anwendung bringen. Sie beherrschen sowohl die grundlegenden mathematischen Methoden zur Modellbildung mit Fuzzy-Systemen (Zugehörigkeitsfunktionen, Inferenzmethoden, Defuzzifizierungsmethoden) und zum Einsatz von Fuzzy-Reglern (Mamdani-Regelung oder Einsatz von hybriden adaptiven Reglern mit Fuzzy-Komponenten) in praktischen Anwendungsfällen.
- Begriff Computational Intelligence, Anwendungsgebiete und -beispiele
- Fuzzy Logik und Fuzzy-Mengen
- Fuzzifizierung und Zugehörigkeitsfunktionen
- Inferenz: T-Normen und -Konormen, Operatoren, Prämissenauswertung, Aktivierung, Akkumulation
- Defuzzifizierung: Verfahren
- Reglerstrukturen für Fuzzy-Regler
- Rechnerübungen (fuzzyTECH) und Anwendungen (Kranregelung)

- Die Studierenden können die Methoden der Künstlichen Neuronalen Netze und Evolutionären Algorithmen zielgerichtet und effizient zur Anwendung bringen. Sie beherrschen dazu sowohl die grundlegenden mathematischen Methoden als auch die Vorgehensweisen für geeignete Problemformulierungen zum Anwenden auf technische Problemstellungen (Auswahl geeigneter Verfahren bei Neuronalen Netzen, Optimierung mit Evolutionären Algorithmen inkl. Kodierung von potenziellen Lösungen als Individuen).
  - Begriffe und Definitionen, Anwendungsgebiete und -beispiele
  - Biologie neuronaler Netze
  - Künstliche Neuronale Netze: Neuronen, Multi-Layer-Perceptrons, Radiale-Basis-Funktionen, Kohonen-Karten, Arbeitsweise, Lernverfahren (Backpropagation, Levenberg-Marquardt)
  - Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen und Evolutionäre Strategien, Mutation, Rekombination, Bewertung, Selektion, Einbindung lokaler Suchverfahren
  - Rechnerübungen (Gait-CAD, GLEAMKIT) und Anwendungen

- Die Studierenden können die Methoden der Datenanalyse zielgerichtet und effizient zur Anwendung bringen. Sie beherrschen sowohl die grundlegenden mathematischen Methoden zur Analyse von Einzelmerkmalen und Zeitreihen mit Klassifikations-, Cluster- und Regressionsverfahren inkl. einer Auswahl praxisrelevanter Verfahren (Bayes-Klassifikatoren, Support-Vektor-Maschinen, Entscheidungsbäume, Fuzzy-Regelbasen) als auch Einsatzszenarien zur Beherrschung praktischer Problemstellungen (Datenaufbereitung, Validierungen).
- Einführung und Motivation
- Begriffe und Definitionen (Arten von mehrdimensionalen Merkmalen - Zeitreihen und Bilder, Einteilung Problemstellungen)
- Einsatzszenario: Problemformulierungen, Merkmalsextraktion, -bewertung, -selektion und -transformation, Distanzmaße, Bayes-Klassifikation, Support-Vektor-Maschinen, Entscheidungsbäume, Cluster-Verfahren, Regression, Validierung
- Anwendungen (Software-Übung mit Gait-CAD): Steuerung Handprothese, Energieprognose

# Einf. in die Finite-Elemente-Methode (4 SWS)

- Die Studierenden können die Finite-Element-Methode (FEM) effektiv für Festigkeits- und Temperaturanalysen einsetzen. Die Studierenden kennen die mathematischen und mechanischen Grundlagen der FEM. Sie können die schwache Formulierung von Randwertproblemen herleiten und das Gleichungssystem der FEM aufstellen. Sie kennen numerische Lösungsverfahren linearer Gleichungssysteme. Die Studierenden besitzen damit die notwendigen Vorkenntnisse für eine Tätigkeit in Berechnungs- bzw. Konstruktionsabteilungen.
  - Einführung und Motivation
  - Elemente der Tensorrechnung
  - Das Anfangs-Randwertproblem der linearen Wärmeleitung
  - Das Randwertproblem der linearen Elastostatik
  - Raumdiskretisierung bei 3D-Problemen
  - Lösung des Randwertproblems der Elastostatik
  - Lösungsverfahren für lineare Gleichungssysteme
  - Elementtypen
  - Fehlerschätzung

- Die Studierenden können die mathematischen Methoden der Festigkeitslehre zielgerichtet und effizient zur Anwendung bringen. Sie beherrschen die grundlegenden Prinzipien der Tensoralgebra und -analysis zur kontinuumsmechanischen Modellbildung von Bauteilen. Sie können die Kontinuumsmechanik zur Dimensionierung von Bauteilen anwenden.
- Tensoralgebra: Vektoren; Basistransformation; dyadisches Produkt; Tensoren 2. Stufe
- Eigenschaften von Tensoren 2. Stufe: Symmetrie, Antimetrie, Orthogonalität etc.
- Eigenwertproblem, Theorem von Cayley-Hamilton, Invarianten; Tensoren höherer Stufe
- Tensoranalysis :Tensoralgebra und -analysis in schiefwinkligen und krummlinigen Koordinatensystemen
- Differentiation von Tensorfunktionen
- Anwendungen der Tensorrechnung in der Festigkeitslehre Kinematik infinitesimaler und finiter Deformationen
- Transporttheorem, Bilanzgleichungen, Spannungstensor
- Elastizitätstheorie, Thermoelastizitätstheorie, Plastizitätstheorie



# Math. Methoden der Strukturmechanik (3 SWS)

- Die Studierenden können die mathematischen Methoden der Strukturmechanik zielgerichtet und effizient zur Anwendung bringen. Sie beherrschen die grundlegenden Prinzipien der Variationsrechnung sowie die Variationsprinzipien der Mechanik. Sie kennen die Ansätze und Homogenisierungsmethoden zur Beschreibung von Werkstoffen mit Mikrostruktur.
- I Grundlagen der Variationsrechnung ;Funktionale; Frechet-Differential; Gateaux-Differential; Extremwertprobleme, Grundlemma der Variationsrechnung und Lagrange'scher Delta-Prozess; Euler-Lagrange-Gleichungen
- II Anwendungen: Prinzipien der Kontinuumsmechanik , Variationsprinzipien der Mechanik; Variationsformulierung des Randwertproblems der Elastostatik Verfahren von Ritz; Finite-Element-Methode
- III Anwendungen: Homogenisierungsmethoden für Werkstoffe mit Mikrostruktur Mesoskopische und makroskopische Spannungs- und Dehnungsmaße, Homogenisierung elastischer Werkstoffeigenschaften : Elementare Schranken nach Voigt und Reuss; Hashin-Shtrikman-Schranken , Abschätzungen effektiver elastischer Eigenschaften

# Numerische Strömungsmechanik (2 SWS) (Ziele)

- Die Vorlesung führt anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele in die numerischen Grundlagen der Lösungsmethoden der strömungsmechanischen Grundgleichungen ein. In Anlehnung an industrielle Technologieprogramme werden numerische Lösungsmethoden aus den Bereichen Tragflügelströmung, Kfz-Aerodynamik, Strömungsmaschinen und Wärmetransportprobleme vorgestellt. Im Einzelnen werden Algorithmen zur Geometriedefinition und Netzgenerierung sowie verschiedene numerische Lösungsverfahren auf unterschiedlichen Rechnerarchitekturen behandelt.
- Der Student kennt die grundlegenden Vorgehensweisen bei der Planung und Durchführung numerischer Simulationen strömungsmechanischer Probleme. Er ist in der Lage, ein einfaches strömungsmechanisches Problem zu analysieren und in ein gut gestelltes mathematisch-numerisches Modell zu übersetzen. Wenngleich die Vorlesung nur die wichtigsten Modelle und Lösungsmethoden behandeln kann, ist der Student in der Lage, weiterführende Fachliteratur zu verstehen und zielgerichtet zu nutzen.

# Numerische Strömungsmechanik (2 SWS) (Inh.)

- Strömungsprobleme: Luftfahrt, Kfz-Technik, Strömungsmaschinen, Wärmeübergang
- Grundgleichungen der Strömungsmechanik: Navier-Stokes-Gleichungen, Reynolds-Gleichungen, Störungs-Differentialgleichungen
- Diskretisierung: Geometriedefinition, Netzgenerierung, Diskretisierung in Raum und Zeit, Fehlerverhalten, Konvergenz, Konsistenz und Stabilität
- Numerische Lösungsmethoden: Finite-Differenzen-, Finite-Volumen-, Finite-Elemente-Verfahren und Spektralmethoden
- Rechnerarchitekturen und Rechnertechnik: Rechenanlagen und Datennetze, Programmierung von Vektor- und Parallelrechnern
- Beispiellösungen: Flugzeugtragflügel, Konvektionsströmung

# Plastizitätstheorie (2 SWS)

- Die Studierenden kennen die Grundlagen der Elastizitäts- und Plastizitätstheorie großer Deformationen. Sie beherrschen Tensoralgebra und -analysis sowie die Kinematik großer Formänderungen.

Die Studierenden können die Bilanzgleichungen in regulären und irregulären Punkten aufstellen und die Prinzipien der Materialtheorie anwenden. Sie kennen die Grundgleichungen der finiten Elastizitätstheorie und der Plastizitätstheorie. Im Rahmen der Plastizitätstheorie kennen die Studierenden die Theorie der Kristallplastizität.

- Tensorrechnung, Kinematik, Bilanzgleichungen
- Prinzipien der Materialtheorie
- Finite Elastizitätstheorie
- Infinitesimale Elasto(visko)plastizitätstheorie
- Exakte Lösungen der infinitesimalen Plastizitätstheorie
- Finite Elasto(visko)plastizitätstheorie
- Infinitesimale und finite Kristall(visko)plastizitätstheorie
- Verfestigung und Materialversagen

# Rechnerunterstützte Mechanik II (2 SWS)

- Die Studierenden können die theoretischen Grundlagen des inelastischen mechanischen Materialverhaltens sicher anwenden und beherrschen dessen numerische Implementierung. Die Studierenden können für zweidimensionale nichtlineare Probleme der Festkörpermechanik die schwache Formulierung ableiten und die numerische Lösung der diskretisierten Gleichungen mittels der Finite-Element-Methode umsetzen. Sie kennen die Grundzüge der Numerik nichtlinearer Gleichungssysteme, Kinematik und Bilanzgleichungen der nichtlinearen Festkörpermechanik, der finiten Elastizität und infinitesimalen Plastizität, der linearen und nichtlinearen Thermoelastizität..
- Überblick über quasistatische nichtlineare Phänomene
- Numerik nichtlinearer Gleichungssysteme
- Kinematik
- Bilanzgleichungen der geometrisch nichtlinearen Festkörpermechanik
- Finite Elastizität
- Infinitesimale Plasizität
- Lineare und geometrisch nichtlineare Thermoelastizität

# Simulation gekoppelter Systeme (am Beispiel mobiler Arbeitsmaschinen)

- Nach der Teilnahme an Vorlesung und Übung sollen die Studierenden in der Lage sein, grundlegende Systeme selbstständig zu entwerfen, sowie komplexe bestehende Systeme zu verstehen.
- Die Simulation ist heute ein in der industriellen Praxis eingesetztes und etabliertes Werkzeug, mit dem Entwicklungszeit und Kosten reduziert werden können. Auch in der Entwicklung mobiler Arbeitsmaschinen wird die Simulation als Hilfsmittel eingesetzt. Allerdings ist es den Herstellern dieser Maschinen bisher nicht möglich, komplette Arbeitsmaschinen in der Simulation abzubilden. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Ein ausschlaggebender Grund ist, dass eine mobile Arbeitsmaschine eine Verschmelzung von mechanischen, hydraulischen und elektronischen Komponenten zu einem System darstellt. Die Vorlesung vermittelt Kenntnisse, um die verschiedenen Fachgebiete mit Hilfe am Markt etablierter Simulationsprogramme abzubilden und das Gesamtsystem durch eine Kopplung der Programme zu simulieren.

# Simulation gekoppelter Systeme (am Beispiel mobiler Arbeitsmaschinen)

- Grundlagen von Mehrkörper- und Hydrauliksimulationsprogrammen
- Möglichkeiten einer gekoppelten Simulation
- Durchführung einer Simulation am Beispiel des Radladers

Am Beispiel der Arbeitsbewegung eines Radladers werden die Möglichkeiten von Simulationsprogrammen dargestellt und die damit verbundenen Schwierigkeiten. Als Lösung wird die gekoppelte Simulation mehrerer Programme an dem genannten Beispiel erarbeitet.

# Kontinuumsschwingungen

- Schwingungen von Kontinua
- Rechenmethoden zur Behandlung eindimensionaler Kontinua (Saiten, Stäbe, Balken, etc)
- Zweiparametrische Kontinua (Platten, Scheiben)
- Behandlung zusätzlicher Effekte (z.B. rotierende Kontinua)



# Mathematische Methoden der Schwingungslehre

- Berechnungsmethoden dynamischer Systeme im Zeit- und Frequenzbereich
- Lösungsmethoden für lineare, gewöhnliche Differentialgleichungen
- Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen
- Prinzip von Hamilton
- Analytische Verfahren
- Einführung in die Stabilitätstheorie
- Ausgewählte Näherungsmethoden (Störungsrechnung)

# Dynamik vom KFZ-Antriebsstrang

- Erwerben der Kompetenzen im Bereich dynamischer Modellierung vom KFZ-Antriebsstrang inclusive wesentlicher Komponenten, Fahrsituationen und Anforderungen
- Hauptkomponenten eines KFZ-Antriebsstrangs und ihre Modelle
- Typische Fahrmanöver
- Problembezogene Modelle für einzelne Fahrsituationen
- Gesamtsystem: Betrachtung und Optimierung vom Antriebsstrang in Bezug auf dynamisches Verhalten

# Stabilitätstheorie

- Wesentliche Methoden der Stabilitätsanalyse lernen
- Anwendung der Stabilitätsanalyse für Gleichgewichtslagen
- Anwendung der Stabilitätsanalyse für periodische Lösungen
- Anwendung der Stabilitätsanalyse in der Regelungstechnik

## Inhalt

- Grundbegriffe der Stabilität
- Lyapunov'sche Funktionen
- Direkte Lyapunov'sche Methode
- Stabilität der Gleichgewichtslage
- Einzugsgebiet einer stabilen Lösung
- Stabilität nach der ersten Näherung
- Systeme mit parametrischer Anregung
- Stabilitätskriterien in der Regelungstechnik

# Nichtlineare Schwingungen

- Wesentliche nichtlineare Effekte erkennen können
- Minimalmodelle nichtlinearer Effekte kennenlernen
- Störungsmethoden zur Analyse nichtlinearer Systeme anwenden können
- Grundlagen der Bifurkationstheorie erlernen
- Dynamisches Chaos erkennen können

## Inhalt

- Dynamische Systeme
- Die Grundideen asymptotischer Verfahren
- Störungsmethoden: Linstedt-Poincare, Mittelwertbildung, Multiple scales
- Grenzzyklen
- Nichtlineare Resonanz
- Grundlagen der Bifurkationsanalyse, Bifurkationsdiagramme
- Typen der Bifurkationen
- Unstetige Systeme
- Dynamisches Chaos

# Schwingungstechnisches Praktikum

- Einführung in gebräuchliche Meßprinzipie für mechanische Schwingungen
- Kennenlernen ausgewählter Schwingungsproblemen verschiedener Kategorien in Theorie und Experiment
- Messung, Auswertung und kritischer Vergleich mit Modellrechnungen.

## Inhalt

- Frequenzgang eines krafterregten einläufigen Schwingers
- Erzwungene Schwingungen eines stochastisch angeregten Schwingers mit einem Freiheitsgrad
- Digitale Verarbeitung von Messdaten
- Messung des Lehrschen Dämpfungsmaßes im Resonanzversuch
- Zwangsschwingungen eines Duffingschen Drehschwingers
- Dämmung von Biegewellen mit Hilfe von Sperrmassen
- Biegekritische Drehzahlen eines elastisch gelagerten Läufers
- Instabilitätserscheinungen eines parametererregten Drehschwingers
- Resonanzbeanspruchung eingespannter verjüngter Stäbe
- Experimentelle Modalanalyse

# Dynamik mechanischer Systeme mit tribologischen Kontakten

- Einführung in grundlegende Aspekte mechanischer Systeme mit Kontakten
- Einbeziehung tribologische Parameter der Kontaktpaarungen
- Physikalisch-mathematische Beschreibung
- notwendige Lösungsstrategien, wie sie auch in gängiger Software zum Einsatz kommen
- Anhand einer Auswahl von Beispielproblemen werden typische dynamische Phänomene diskutiert

## Inhalt

- Einführung in die Kontakt-Kinematik
- Kinetik von Systeme mit unilateralen, reibungsbehafteten Kontakten
- Mathematische Lösungsstrategien
- Einführung in die Kontaktmechanik
- Normalkontakt (Hertzscher Kontakt, rauhe Oberfläche, Kontaktgesetze)
- Stöße (Newtonsche Stoßhypothese, Wellenphänomene)
- Reibungserregte Schwingungen (Stick-Slip, Bremsenquietschen)
- Geschmierte Kontakte: Rotoren in Gleitlagern, EHD-Kontakt

# Fragen ?