

# Schwerpunkt: Dynamik und Schwingungslehre

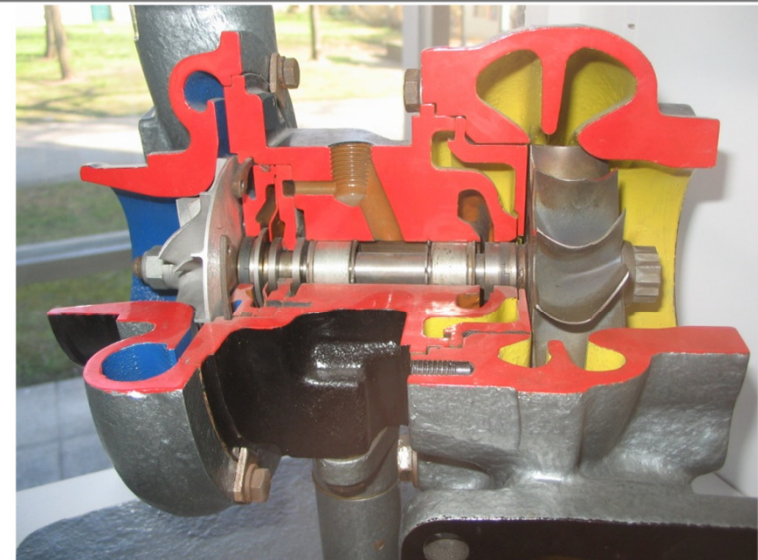
26.11.2014

Wolfgang Seemann

Institut für Technische Mechanik  
Fakultät für Maschinenbau

## Outline

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



# Kernfächer und Wahlpflichtfächer

## Kernfächer (Wahlpflichtfach)

- **Maschinendynamik (3 SWS)**
- **Einführung in die Mehrkörperdynamik (3 SWS)**
- **Technische Schwingungslehre (3 SWS)**

## Ergänzungsfächer

- CAE-Workshop
- Dynamik mechanischer Systeme mit tribologischen Kontakten
- Dynamik vom KFZ-Antriebsstrang
- Einführung in die Wellenausbreitung
- Einführung in nichtlineare Schwingungen
- Konstruktiver Leichtbau
- Maschinendynamik II
- Messung mechanischer Schwingungen
- Rechnergestützte Dynamik
- Rechnergestützte Fahrzeugdynamik
- Rechnergestützte Mehrkörperdynamik
- Schwingungstechnisches Praktikum
- Simulation im Produktentstehungsprozess
- Softwaretools der Mechatronik
- Stabilitätstheorie
- Systemtheorie der Mechatronik
- Verhaltensgenerierung für Fahrzeuge
- Kontinuumsschwingungen

# Ergänzungsfächer

- **Einführung in die Modellierung von Raumfahrtssystemen**
- **Hydrodynamische Stabilität: von der Ordnung zum Chaos**

# 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.

# Maschinendynamik (3 SWS)

- Anwendung ingenieurmäßiger Berechnungsmethoden zu Modellierung und Interpretation dynamischer Effekte rotierender Maschinenteile wie Anfahren, kritische Drehzahlen und Auswuchten von Rotoren, Massen- und Leistungsausgleich von Hubkolbenmaschinen.
  - Maschinen als mechatronische Systeme
  - Starre Rotoren: Stationärer und instationärer Betrieb, Auswuchten
  - Elastische Rotoren, Laval-Rotor, biegekritische Drehzahlen, mehrfach und kontinuierlich besetzte Wellen
  - Dynamik der Hubkolbenmaschine

# CAE Workshop (3 SWS)

- Im CAE - Workshop werden rechnergestützte Werkzeuge vorgestellt, die im industriellen Produktentstehungsprozess eingesetzt werden. Beispiele verdeutlichen Ablauf der Prozesskette. Damit Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen der virtuellen Produktentwicklung. Studenten bekommen einen praxisnahen Einblick in die Welt der Mehrkörpersysteme, der finiten Elemente und Optimierungsfragestellungen.

Nutzung von industriegebräuchlicher Software. Kritische Auseinandersetzung mit den Berechnungs- und Optimierungsergebnissen.

- Einführung in die Finite Elemente Analyse (FEA)
- Spannungs- und Modalanalyse von FE-Modellen
- Einführung in die Topologie- und Gestaltoptimierung
- Erstellung und Berechnung verschiedener Optimierungsmodelle
- Einführung in die Finite Elemente Methode
- Spannungs- und Modalanalyse von FE-Modellen
- Einführung in die Mehrkörpersimulation
- Kopplung von MKS und FEM



# 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

# 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

# Einführung in die Wellenausbreitung (2 SWS)

- Einführung in Wellenausbreitungsvorgänge der Mechanik . Wellen in eindimensionalen Kontinua (Saite, Balken, Stäbe) , Wellen in mehrdimensionalen Kontinua. Anfangswertprobleme, grundlegende Begriffe wie Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit oder Dispersion. Physikalische Grenzen von Strukturmodellen (z.B. Balkenmodellen), Oberflächenwellen und Schallwellen.
  - Wellenausbreitung in Saiten und Stäben, d'Alembertsche Lösung
  - Anfangswertproblem, Randbedingungen, Zwangserregung am Rande
  - Energietransport, Wellenausbreitung in Balken, Euler-Bernoulli-Balken Gruppengeschwindigkeit, Balken mit unstetigem Querschnitt, Reflexion und Transmission, Timoshenko-Balken
  - Wellenausbreitung in Membran und Platten
  - Schallwellen, Reflexion und Brechung, Kugelwellen
  - s- und p-Wellen in elastischen Körpern, Reflexion und Transmission an Grenzflächen
  - Oberflächenwellen

# Einführung in nichtlineare Schwingungen (2+1 SWS)

- Analytische Berechnungsmethoden für nichtlineare dynamische Systeme.  
Einführung in die allgemeine Stabilitätstheorie (nichtlinearer Fall).  
Störungsmethoden für gewöhnliche Differentialgleichungen.  
Nichtlineare Effekte in Maschinen und Systemen.
- Stabilitätsdefinition nach Lyapunov, direkte Methode
- Relation zwischen den Stabilitätsaussagen anhand linearer Näherung und direkter Methode
- Grundideen asymptotischer Verfahren, Sinn einer asymptotischen Entwicklung
- Störungsmethode

# Konstruktiver Leichtbau (2 SWS)

- Schlüsseltechnologien für Material- und Energieeffizienz, Umwelt- und Klimaschutz.. Vermittlung von Grundlagen des Leichtbaus im ganzheitlichen Rahmen und dessen Kontext zum Produktentstehungsprozess und der damit verbundenen komplexen Zusammenhänge. Fundiertes Verständnis zum klassischen und modernen Leichtbau.

Die Vorlesung wird durch Gastvorträge "Leichtbau aus Sicht der Praxis" aus der Industrie ergänzt.

- Allgemeine Aspekte des Leichtbaus
- Leichtbaustrategien, Gestaltungsprinzipien, Leichtbaukonstruktion
- Versteifungsmethoden
- Leichtbaumaterialien
- Virtuelle Produktentwicklung
- Bionik
- Verbindungstechnik
- Validierung
- Recycling

# Maschinendynamik II (2 SWS)

- Befähigung zu vertiefter Modellbildung in der Maschinendynamik auf den Gebieten Kontinuumsmodelle, Fluid-Struktur-Interaktion, Stabilitätsanalysen
  - Gleitlager
  - Rotierende Wellen in Gleitlagern
  - Riementriebe
  - Schaufelschwingungen

# Rechnergestützte Dynamik (2 SWS)

- Die Vorlesung vermittelt die Fähigkeit, selbständig strukturdynamische Probleme numerisch zu lösen. Hierzu werden Schwingungsdifferentialgleichungen von Strukturelementen hergeleitet und numerische Verfahren zu ihrer Lösung entwickelt
- Grundlagen der Elastokinetik (Verschiebungsdifferentialgleichung, Prinzip von Hamilton und Hellinger-Reissner)
- Schwingungsdifferentialgleichungen für Strukturelemente (Stäbe, Platten)
- Numerische Lösung der Bewegungsgleichungen
- Numerische Algorithmen
- Stabilitätsanalysen

# Rechnergestützte Fahrzeugdynamik (2 SWS)

- Ziel ist eine Einführung in die rechnergestützte Modellbildung und Simulation des Systems Fahrzeug-Fahrweg. Methodenorientierter Ansatz, bei dem nicht nach einzelnen Fahrzeugarten differenziert wird, sondern eine gemeinsame Behandlung der Modellbildung und Simulation unter systemtheoretischer Betrachtungsweise angestrebt wird. Grundlage ist die Modularisierung der Fahrzeugteilsysteme mit standardisierten Schnittstellen. Fahrzeugmodell mit Hilfe von Modellen für Trag- und Führsysteme durch Fahrwegmodell ergänzt. Berechnungsmethoden für lineare und nichtlineare Fahrzeugsysteme. Beurteilungskriterien für Fahrstabilität, Fahrsicherheit und Fahrkomfort. Als Software zur Simulation wird während der Vorlesung das Programm Simpack eingesetzt.
- Modelle für Trag- und Führsysteme
- Kontaktkräfte zwischen Rad und Fahrweg
- Fahrwegsanregungen
- Gesamtfahrzeugmodelle
- Berechnungsmethoden
- Beurteilungskriterien



# Rechnergestützte Mehrkörperdynamik (2 SWS)

- Ziel: mit Hilfe von Computerprogrammen die räumliche Bewegung eines Körpers und von Mehrkörpersystemen zu verstehen. Durch Verlagerung der rechenintensiven Schritte bei der Beschreibung der Kinematik und der Herleitung der Bewegungsgleichungen auf den Rechner, wird es möglich, sich auf die 'dahintersteckende Mechanik' zu konzentrieren. Am Ende der Vorlesung sollte verstanden werden, welche Prinzipien bei kommerziellen Computerprogrammen die Grundlage zur Herleitung der Gleichungen und der numerischen Integration der Bewegungsgleichungen sind.
- Beschreibung der Orientierung eines starren Körpers
- Winkelgeschwindigkeit, Winkelbeschleunigung
- Ableitung in verschiedenen Koordinatensystemen, Ableitungen von Vektoren
- Holonome und nichtholonome Zwangsbedingungen
- Prinzip von d'Alembert
- Prinzip der virtuellen Leistung
- Lagrangesche Gleichungen
- Kaneschen Gleichungen
- Struktur der Bewegungsgleichungen
- Grundlagen der numerischen Integration

## Schwingungstechnisches Praktikum (2 SWS)

- Einführung in gebräuchliche Meßprinzipie für mechanische Schwingungen, Kennenlernen ausgewählter Schwingungsprobleme verschiedener Kategorien in Theorie und Experiment, Messung, Auswertung und kritischer Vergleich mit Modellrechnungen.
- Frequenzgang eines krafterregten einläufigen Schwingers
- Erzwungene Schwingungen eines stochastisch angeregten Schwingers
- 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

# Simulation im Produktentstehungsprozess (2 SWS)

- Zusammenspiel zwischen Simulationsmethoden, der dafür benötigten Informationstechnik sowie die Integration dieser Methoden in den Produktentwicklungsprozess. Grundlegende Näherungsverfahren der Mechanik sowie die Methoden der Materialmodellierung unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode. Einbindung in den Produktentstehungsprozess sowie die Notwendigkeit der Kopplung unterschiedlicher Methoden und Systeme. Beherrschung der Modellierung heterogener technischer Systeme, wesentlichen Aspekte der virtuellen Realität.

.

- Näherungsverfahren der Mechanik: FDM, BEM, FEM, MKS
- Materialmodellierung mit der Finite-Elemente-Methode
- Positionierung im Produktlebenszyklus
- Kopplung von Methoden & Systemintegration
- Modellierung heterogener technischer Systeme
- Funktionaler Digital Mock-Up (DMU), virtuelle Prototypen

## Softwaretools der Mechatronik (2 SWS)

- Das Praktikum umfasst eine Einführung in die kommerziellen Softwarepakete Maple, Matlab, Simulink und Adams.  
Neben einer seminaristischen Einweisung in die Programme werden erste mechatronische Problemstellungen mit diesen Programmen an PCs gelöst.
- Einführung in Maple, Generierung der nichtlinearen Bewegungsgleichungen eines Doppelpendels, Stabilitäts-, Eigenwert- und Resonanzuntersuchungen eines Laval-Rotors
- Einführung in Matlab, Zeitintegration mittels Runge-Kutta zur Simulation eines Viertelfahrzeugmodells, Lösen der partiellen Differentialgleichungen eines Dehnstabs mit Hilfe eines Galerkin-Verfahrens
- Einführung in Simulink, Gleichungen von Ein- und Zweimassenschwingern mit Blockschaltbildern abbilden, Realisierung einer PID-Abstandsregelung für Fahrzeuge
- Einführung in Adams, Modellierung und Simulation eines Rotoberarms

# 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

## Systemtheorie der Mechatronik (2 SWS)

- Die Vorlesung Systemtheorie der Mechatronik konzentriert sich dabei auf die Beschreibung mechatronischer Systeme mit Hilfe von physikalischen und mathematischen Modellen. Der Systembegriff steht dabei im Vordergrund. Ziel ist es, den Studenten disziplinenübergreifende Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, mit denen die mathematischen Modelle der mechatronischen Systeme hergeleitet werden können.
- - Theoretische Modellbildung mittels synthetischer und analytischer Methoden
  - Klassifizierung von Systemelementen
  - Grundgleichungen, konstitutive Gleichungen
  - Kinetisches Potential, virtuelle Arbeit
  - Systeme mit verteilten Parametern
  - Prinzip von Hamilton für mechatronische Systeme
  - Grundlagen der experimentellen Modellbildung
  - Grundlagen der Festkörpermechanik und der Fluidmechanik
  - Grundlagen der Elektrotechnik
  - Sensoren und Aktoren, Wandlerprinzipie
  - Einführung in die Regelung mechatronischer Systeme

## Verhaltensgenerierung für Fahrzeuge (2 SWS)

- Moderne Fahrzeugregelsysteme wie ABS oder ESP bilden den Fahrerwunsch in ein entsprechendes Fahrzeugverhalten ab und wirken dadurch Störungen wie variablen Kraftschlussbeiwerten entgegen. Zunehmend verfügen Fahrzeuge über umfeldwahrnehmende Sensorsysteme (Radar, Lidar, Video). Dadurch wird es Automobilen künftig möglich, der Umgebung angepasstes ‚intelligentes‘ Verhalten zu generieren und regelungstechnisch umzusetzen
  - Fahrerassistenzsysteme (insbesondere ABS, ESP, ACC)
  - Fahrkomfort und Fahrsicherheit
  - Fahrzeugdynamik
  - Trajektorienplanung
  - Trajektorienregelung
  - Kollisionsvermeidung

## Kontinuumsschwingungen (2 SWS)

- Schwingungen kontinuierlicher Systeme. Grundsätzliche Behandlung der notwendigen Begriffe und Rechenmethoden. Einparametrische Kontinua (Saiten, Stäbe) sowie zweiparametrische Kontinua (Scheiben, Platten). Ausblick auf kompliziertere Strukturen. Neben grundsätzlichen Effekten werden auch weiterführende Themen wie rotierende Systeme (am Beispiel elastischer Rotoren) behandelt.
- Partielle Differentialgleichungen
- Rand- und Anfangsbedingungen
- Separationsansatz
- Transzendentes Eigenwertproblem
- Orthogonalität der Eigenfunktionen
- Erzwungene Schwingungen



# Berufsbild

- **Entwicklungsabteilung**
- **Simulation zunehmend wichtig**
- **Experimentelle Arbeiten (Versuch)**
- **Vermeidung von Schwingungen**
- **Gezielte Generierung von Schwingungen**
- **Eng verwandt mit Regelungstechnik**
- **Breit einsetzbar in vielen Branchen (nicht nur Automobil und Zulieferer)**
- **In Zukunft gefragt (mangels fehlender Absolventen dieser Fachrichtung)**
- **Durch breite und fundierte Ausbildung vielseitig einsetzbar und flexibel**

# Fragen ?