

# Zur Lehre des Pflichtfaches Maschinendynamik an der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau

H. Dresig

*Es wird dargestellt, in welcher Form das Pflichtfach „Maschinendynamik“ an der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau vermittelt wird. Stoff- und Zeitplan, ein Teil der individuellen Belegaufgaben und die Prüfungsaufgaben werden interessierten Fachleuten zur Diskussion gestellt.*

## 1 Einleitung

Auf der 164. Plenarversammlung der Hochschulrektorenkonferenz in Bonn wurde am 1. 7. 1991 unter anderem die Rahmenprüfungsordnung für den Diplomstudiengang Maschinenbau beschlossen (Rahmenordnung, 1991). Dieses Dokument legt fest, daß zum ersten Prüfungsabschnitt der Diplomprüfung sechs Pflichtfächer gehören, wobei aus Sicht der Mechanik die Pflichtfächer „Strömungslehre“ (Pflichtfach 2) und „Maschinendynamik“ (Pflichtfach 3) von Interesse sind.

Die Auffassungen zum Lehrgebiet Maschinendynamik sind an den verschiedenen Technischen Universitäten und Technischen Hochschulen unterschiedlich, wie auch aus vergleichbaren Lehrbüchern hervorgeht. In der deutschen Fachliteratur, die in den vergangenen 20 Jahren stark angewachsen ist, werden je nachdem, aus welchem Arbeitsgebiet die Autoren stammen, maschinendynamische Problemstellungen vom Standpunkt der theoretischen Mechanik und Regelungstechnik (Bremer, 1988; Bremer und Pfeiffer, 1982; Schiehlen, 1993), der Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeuge (Hafner und Maass, 1984, 1985; Laschet, 1988; Maass und Klicr, 1981; Popp und Schiehlen, 1993), der Rotoren und Turbomaschinen (Federn, 1977; Krämer, 1984; Lingenier, 1992) oder der technischen Schwingungslehre (Dresig u.a., 1987; Fischer und Stephan, 1993; Hagedorn und Otterbein, 1987; Hagedorn, 1989; Knaebel, 1987; Marguerre und Wölfel, 1979; Müller und Schiehlen, 1976; Waller und Schmidt, 1989) behandelt. Bücher, welche direkt auf Probleme der Maschinendynamik zielen, wurden von Dresig und Rockhausen (1994), Dresig u.a. (1987), Holzweißig und Meltzer (1978), Holzweißig und Dresig (1994), Knaebel (1987), Krämer (1984), Waller und Krings (1975) und Ziegler (1990) geschrieben, wobei die Grenzen, insbesondere zur „Technischen Schwingungslehre“ fließend sind.

Bei diesem umfangreichen Stoffgebiet hat jeder Hochschullehrer das Problem zu lösen, welchen Stoff er behandelt, welchen er wegläßt und wieviel Zeit er den einzelnen Gebieten widmet. Die an meinem Lehrstuhl vertretene Lehrmeinung soll hier zur Diskussion gestellt werden, um den Erfahrungsaustausch zwischen den Hochschullehrern und interessierten Fachleuten aus der Industrie anzuregen. Meine Auffassung entwickelte sich in engem wissenschaftlichen Kontakt mit meinem Kollegen Holzweißig von der Technischen Universität Dresden, der bereits im Jahre 1964 die ersten Vorlesungen zur „Maschinendynamik“ an Stelle der bis dahin üblichen „Höheren Dynamik“ einführte.

Sicher hat bei der Einführung dieses Pflichtfaches eine Rolle gespielt, daß die Maschinendynamik mit vielen anderen technischen Disziplinen sowie mit der Mathematik und Physik eng verknüpft ist. Sie stellt ein Gebiet dar, bei dem die mechanisch-mathematische Modellierung technischer Prozesse eine große Rolle spielt und das aus diesem Grund auch für solche Ingenieure von Bedeutung ist, die sich in ihrer Berufspraxis nicht ausschließlich der Lösung dynamischer Probleme widmen.

Die Bedeutung der Maschinendynamik wächst mit der technischen Weiterentwicklung im Maschinenbau aus folgenden Gründen:

- die Arbeitsgeschwindigkeiten (Hubzahlen, Taktzahlen, ...) vieler Maschinen steigen wegen angestrebter Produktivitätserhöhung und verursachen damit höhere dynamische Belastungen,
- der Leichtbau (Materialeinsparung) setzt sich in fast allen Maschinenbau-Bereichen immer stärker durch, wodurch meist die Schwingungsanfälligkeit der Maschinen zunimmt,
- Probleme der Schwingungs- und Lärmbekämpfung treten aus Gründen des Arbeitsschutzes immer mehr in den Vordergrund,
- die moderne Antriebstechnik führt zu einem engeren Zusammenspiel von Problemen der Informatik, der Antriebstechnik und der Regelungstechnik (Mechatronik),
- mit der technischen Entwicklung erweitern sich die Möglichkeiten der Computersimulation und der experimentellen Analyse realer dynamischer Vorgänge, so daß bisher unerreichbare Gebiete zugänglich werden (technisch und ökonomisch).

## 2 Zum Inhalt des Pflichtfaches „Maschinendynamik“

Die Lehrveranstaltung Maschinendynamik liegt im 5. Semester und hat an der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau, wie an vielen anderen Technischen Hochschulen und Technischen Universitäten, einen Umfang von 2 Stunden Vorlesung und 2 Stunden Übung pro Woche, d.h. 4 SWS (Semesterwochenstunden), obwohl die Rahmenordnung (Rahmenordnung, 1991) dafür als Richtwert 6 SWS vorsieht.

Im Lehrgebiet Maschinendynamik werden Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten vermittelt, die unabhängig von einer speziellen Maschinenart oder von einem technischen Objekt sind und auf beliebige Maschinen (Antriebs- und Tragsysteme) angewandt werden können. Die Maschinendynamik behandelt die Ermittlung dynamischer Kenngrößen und Eigenschaften sowie die mathematische Beschreibung und physikalische Erklärung dynamischer Erscheinungen und Effekte an Maschinen mit analytisch-rechnerischen und experimentellen Methoden.

Damit ist die Maschinendynamik verflochten mit folgenden Fachgebieten:

- Antriebstechnik (Hydraulik, Pneumatik, elektromotorische Antriebe, Getriebetechnik)
- Baudynamik und Strukturmechanik
- Regelungstechnik (gesteuerte und/oder geregelte Antriebe, Sensoren und Aktoren)
- Schwingungstechnik (Aufnehmer, Verstärker, Filter, Auswertetechnik, ...)
- Kontinuumsmechanik (Stoffgesetze, Kraft-Deformations-Beziehungen, Kraftwirkungen infolge Strömungen, ...)
- Systemtheorie, Informatik und Regelungstechnik (Mechatronik).

Meiner Meinung nach besteht eine wichtige Aufgabe dieses Lehrgebietes darin, nicht nur die mathematisch-physikalischen Grundlagen zu vermitteln, sondern auch auf wesentliche Fragen einzugehen, die im konstruktiven Entwicklungsprozeß bei vielen Maschinen auftreten. Es ist dabei ratsam, an Hand realer Maschinen dem Studenten zu erläutern, wie die aus der Theorie folgenden Erkenntnisse bisher in praktische konstruktive Lösungen umgesetzt wurden.

Natürgemäß wird dabei auf klassische Beispiele aus der Geschichte des Maschinenbaus eingegangen. Ich benutze dazu in der Vorlesung viele Folien mit der Darstellung typischer Objekte, angefangen von speziellen Bauteilen und Baugruppen wie Schwingungsisolatoren, Dämpfer, Kurbelwellen und Auswuchtmaschinen bis zu Berechnungsmodellen realer Objekte, Ergebnissen von Finite-Elemente-Methode (FEM)- und Mehrkörpersystem (MKS)-Berechnungen, sowie von theoretischen und experimentellen Modalanalysen, die aus unterschiedlichen Industriezweigen stammen. Da der Maschinenbauingenieur technische Systeme neu entwickeln und/oder verändern und optimal auslegen muß, können solche (positiven und negativen) Beispiele aus der Vergangenheit als lehrreiche Anregung für die Lösung künftiger dynamischer Probleme dienen.

Es kommt meines Erachtens vor allem darauf an, die Invarianten des Fachgebietes zu vermitteln! Als solche sehe ich an:

- die Modellierung (vom realen Objekt zum Berechnungsmodell einschließlich der Parameter-Ermittlung) und die Ergebnisinterpretation (z.B. Analyse von Parametereinflüssen)
- ein klares Verständnis von Massenkräften und ihren Wirkungen
- Methoden zur Aufstellung und Lösung von Bewegungsgleichungen
- Gewinnung heuristischer Regeln zur Beeinflussung von Massenkräften und Schwingungen durch konstruktive Maßnahmen

Schließlich muß auch Fachwissen gelehrt werden, welches nicht deduktiv aus den Grundgleichungen der Mechanik hergeleitet werden kann, z.B. Regeln zur Strukturanalyse, Auswuchtmethoden, Regeln zur Modellbildung, Meßmethoden u.a.m.. Existierende DIN-Vorschriften, Taschenbücher, Nachschlagewerke und VDI-Richtlinien, die wesentliches Ingenieurwissen enthalten, werden genannt bzw. erläutert, da sie auf dem Gebiet der Maschinendynamik ein Arbeitsmittel des Ingenieurs darstellen, z.B. DIN1311, DIN45671, VDI-Richtlinien 2057, 2060, 3840 und die neuen EU-Richtlinien.

### 3 Zum Stoffplan

Die Stoffauswahl habe ich von Jahr zu Jahr leicht verändert. Wesentlich erscheint mir bei der Stoffauswahl, auf das Arbeitsgebiet zu achten, das die meisten Absolventen als künftige Maschinenbau-Ingenieure haben werden. Erfahrungsgemäß bestehen in einem Betrieb, wo in der Konstruktionsabteilung insgesamt pro 30 Mitarbeiter in der Regel nur ein „Dynamiker“ tätig ist, andere Anforderungen, als in einem Großbetrieb, bei dem allein die Forschungs- oder Entwicklungsgruppe Dutzende von Diplomingenieuren umfaßt. In einer mittelständischen Maschinenbaufirma muß die Entscheidung über eine konstruktive Lösung oder zur Behebung eines Schadensfalles innerhalb kurzer Zeit gefällt werden, so daß sich allein aus Termin- und Kostengründen eine umfangreiche dynamische Analyse verbietet.

Die künftigen Ingenieure sollen deshalb vor allem die Probleme richtig erkennen und einordnen können, und sie müssen gegebenenfalls in der Lage sein, eine Aufgabe für einen Spezialisten zu formulieren. Für die Lehre folgt daraus, daß bei der Auswahl des zu vermittelnden Fachwissens auf möglichst Allgemeingültiges und Grundlegendes orientiert wird, so daß der Student im späteren Berufsleben als Ingenieur darauf aufbauen kann. Der Maschinendynamik-Spezialist in einem Großunternehmen (z.B. der Luft- und Raumfahrt, Energie- oder Kerntechnik), in dem mehrere Millionen DM jährlich allein für dynamische Untersuchungen ausgegeben werden, muß tiefere Kenntnisse besitzen. Für ihn werden in diesem Pflichtfach (im 5. Semester) nur die Voraussetzungen für vertiefte Studien in den höheren Semestern geschaffen. Wie an jeder anderen Technischen Hochschule oder Technischen Universität werden auch dazu an der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau weiterführende Lehrveranstaltungen angeboten.

Tabelle 1 zeigt den Fachstudienplan der Fachrichtung Angewandte Mechanik für das Hauptfach Maschinendynamik.

Lehrgebiet	Semesterwochenstunden (SWS)											
	5. Sem.		6. Sem.		7. Sem.	8. Sem.		9. Sem.		10. Sem.		
	V	Ü	Pr	V	Ü	Pr	V	Ü	Pr	V	Ü	Pr
<b>Pflichtfächer</b>												
Meß- und Regelungstechnik	3	1	0	2	1	0						
Strömungslehre	3	1	0									
Maschinendynamik	2	2	0									
Technische Betriebsführung und Arbeitswissenschaft	3	1	0									
Elektromotorische Antriebe				2	1	0						
Mathematische Modellierung technischer Prozesse	2	1	0									
Methodisches Konstruieren	2	1	0									
Experimentelle Mechanik				2	0	1						
Höhere Technische Mechanik	2	2	0									
<b>Kernfächer</b>												
Systemdynamik				2	2	0						
Mechanismen- und Rotordynamik				1	1	0						
Schwingungslehre				1	1	0						
Schwingungsmeßtechnik												
<b>Ergänzungsfächer</b>												
Strukturmechanik									(P)			
Numerische Methoden									2	1	1	
									2	2	0	
<b>Nebenfach</b>												
									4	2	0	P
<b>Wahlpflichtfächer</b>												
technische									(4 Pr)			
nichttechnische									(4 S)			
wirtschaftswissenschaftliche									(4 S)			
<b>Studien- und Projektarbeit</b>												
									400 h			
									400 h			

Tabelle 1. Fachstudienplan für die Fachrichtung Angewandte Mechanik, Hauptfach: Maschinendynamik

Sem. - Semester

V - Vorlesung

Ü - Übung

Pr - Praktikum

P - Prüfung

S - Seminar

Das zu vermittelnde Stoffgebiet hat sich im Laufe der vergangenen Jahrzehnte verändert. War ursprünglich die Lösung der mathematischen Probleme die schwierigste Hürde, ist heutzutage die Modellbildung und Kennwertermittlung (Identifikation) zum Hauptproblem geworden. Die Tendenz geht zu immer allgemeineren und leistungsfähigeren Algorithmen, wobei deren Anzahl reduziert werden kann. Es werden höhere Anforderungen an die mathematische Abstraktion gestellt, ein tieferes physikalisches Verständnis verlangt und ein Denken in größeren Zusammenhängen gefordert.

Die klassischen grafischen und analytischen Methoden, die in der Vergangenheit in der Ausbildung eine große Rolle spielten, sind in den letzten Jahren in der Lehre bedeutend eingeschränkt worden zu Gunsten der Software-Nutzung zur

- Lösung von Eigenwertproblemen,
- numerischen Integration von Differentialgleichungen,
- Lösung von nichtlinearen Optimierungsproblemen,
- Anwendung von Finite-Elemente-Methoden und Mehrkörpersystemen.

Da sich alle Erscheinungen physikalisch aus wenigen Grundgesetzen erklären lassen, ist die Vermittlung der Methoden zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen ein Ziel dieser Lehrveranstaltung, allerdings nicht das einzige. Meiner Meinung nach kann man während der Ausbildung nach wie vor nicht auf die Behandlung der Minimalmodelle mit wenigen Freiheitsgraden verzichten.

Begriffe wie Eigenfrequenz, Eigenform, Resonanz höherer Ordnung, modale Erregerkraft, Tilgung und Dämpfung können schon an Systemen mit 2 und 3 Freiheitsgraden erklärt werden. Dafür spricht, daß ihre Handhabung einfach ist, im Rahmen der Übungszeit bewältigt werden kann, daß die damit erhaltenen Aussagen leicht verständlich sind, und daß Modifikationen am Minimalmodell physikalisch leichter erklärlich und anschaulich sind. Da sich sowohl logisch als auch historisch gesehen die Berechnungsmodelle von Maschinen vom Einfachen zum Komplizierten entwickeln, erscheint das methodische Vorgehen auch in dieser Weise als gerechtfertigt, zumal vieles dann später bei der modalen Betrachtungsweise wieder benutzt werden kann.

Tabelle 2 zeigt, wie ich den Lehrstoff auf die zur Verfügung stehenden 14 Wochen aufteile. Die ersten 4 Wochen verwende ich für die „starre Maschine“, also für die kinetostatischen Kräfte, die bei allen Maschinen auftreten. In den nächsten 4 Wochen werden Minimalmodelle zu drei typischen Problemstellungen behandelt, d.h. Schwingungsisolierung, Torsions- und Biegeschwinger.

Erst nach der 8. Vorlesung halte ich es für zweckmäßig, die Matrizenschreibweise zu benutzen. Bereits in den 70-er Jahren wurde an der Technischen Universität Chemnitz die Matrizenschreibweise in der Lehrveranstaltung Maschinendynamik eingeführt (Holzweißig und Dresig, 1979), obwohl dies anfangs als „für Maschinenbauer zu schwierig“ galt. Bei den linearen diskreten Modellen wiederholt sich dann der Stoff aus den Abschnitten 3 bis 5, aber das ist beabsichtigt, denn „Wiederholung ist die Mutter der Lehre“.

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, ist der Übungsstoff um eine Woche gegenüber der Vorlesung versetzt. In der Übung benutzen wir Aufgaben aus unserer internen Sammlung, von denen einige von Dresig und Rockhausen (1994) veröffentlicht wurden. In der Spalte „Vorlesungsinhalt“ habe ich die Gliederungspunkte so angegeben, wie sie dem Lehrbuch Maschinendynamik (Holzweißig und Dresig, 1994) entsprechen, so daß der interessierte Leser diese Punkte genauer verfolgen kann.

#### **4 Zur Gestaltung der Übungen und Praktika**

Der Übungsbetrieb erfolgt in kleinen Gruppen von etwa 15 Studenten. Den Studenten werden zu Semesterbeginn die Aufgabenstellungen ausgehändigt. Sie werden angehalten, sich auf jede Übung vorzubereiten und dem Übungsleiter Fragen zu stellen, die im Selbststudium entstanden sind. Meist werden die Aufgaben seminariistisch diskutiert und zum Teil die Lösungen vorgerechnet. Besonderer Wert wird darauf gelegt, daß sich jeder Student den Stoff selbständig erarbeitet. Dazu werden pro Semester drei individuelle Aufgaben ausgegeben, die zu den Gebieten

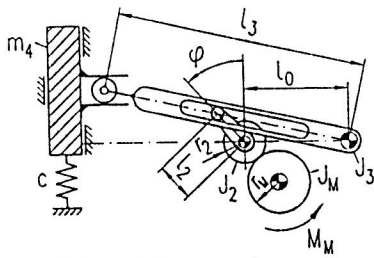
- Mechanismendynamik (Bild 1),
- erzwungene Schwingungen eines ungedämpften Systems mit 2 Freiheitsgraden (Bild 2),
- linearer Vielfachschwinger (Bild 3),

gehören. Von derartigen Aufgaben haben wir eine umfangreiche Sammlung. Die Bilder 1 bis 3 zeigen nur eine Auswahl daraus.

Woche	Vorlesungsinhalt	Übungsinhalt/Aufgaben
1	1. Einführung 2. Dynamik der starren Maschine Bewegungsgleichung der starren Maschine Beispiel: Schubkurbelgetriebe	Wiederholung - LAGRANGE Gleichungen 2. Art (Rollpendel)
2	2.3 Bewegungszustände der starren Maschine Analytische und numerische Lösung Zur numerischen Lösung	Aufstellung und Lösung von Bewegungsgleichungen am Beispiel einer Druckmaschine
3	2.4 Gelenkkräfte und Fundamentbelastung 2.5 Methoden des Massenausgleichs vollständiger und harmonischer Ausgleich	Aufstellung und Lösung von Bewegungsgleichungen am Beispiel einer Druckmaschine (Fortsetzung)
4	2.5.2 Auswuchten starrer Rotoren Physikalische Zusammenhänge konstruktive und praktische Realisierung	Massenausgleich eines Schubkurbelgetriebes
5	3. Aufstellung der starren Maschine Fundamentierung bei harmonischer Erregung und bei Stoßerregung, $f=1$	Auswuchten
6	3.3 Ausführung periodisch erregter Fundamente und System mit zwei Freiheitsgraden	Schwingungsisolierung bei harmonischer Erregung (Schaltschrank)
7	4. Torsionsschwinger von Antrieben Minimalmodell und Schwingerkette Eigenfrequenzen und -formen	Stoßerregtes Fundament (Schmiedehammer)
8	5. Biegeschwinger Kritische Drehzahlen einer Welle Kreiselwirkung eines Antriebes	Torsionsschwingungen
9	6. Lineare Vielfachschwinger 6.1 Einführung 6.2 Bewegungsgleichungen in Matrixschreibweise	Biegeschwingungen einer Maschinenwelle mit $f=2$ (Eigenfrequenzen, Eigenformen)
10	6.3 Freie Schwingungen Eigenfrequenzen, Eigenformen, Orthogonalität	Biegeschwingungen einer Maschinenwelle
11	6.3.3 Anfangsbedingungen Modale Koordinaten, Modalmatrix, modale Massen und Steifigkeiten	Fundament als Mehrkörpersystem
12	6.4 Struktur- und Parameteränderungen Abschätzungen für Eigenfrequenzen, Eigenformen, Empfindlichkeit von Eigenfrequenzen und Eigenformen	Fundament als Mehrkörpersystem (Fortsetzung)
13	6.5 Erregte ungedämpfte Schwingungen Modale Erregerkraft, Harmonische Erregung, Rechteckstoß	Freie Schwingungen eines Gestells (Stoßerregung)
14	6.6 Gedämpfte Schwingungen Zur Dämpfungstheorie, harmonische erzwungene Schwingungen eines Gestells bei modaler Dämpfung, komplexer Frequenzgang, Ortskurven	Erzwungene Schwingungen (periodische Erregung)

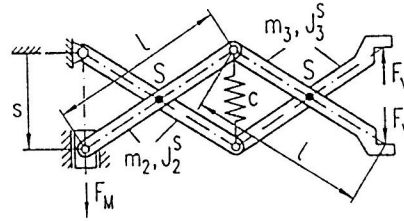
Tabelle 2. Gliederung der Vorlesung „Maschinendynamik“

Waagrecht-Stoßmaschine



Feder c bei  $\cos \varphi = 0$   
entspannt

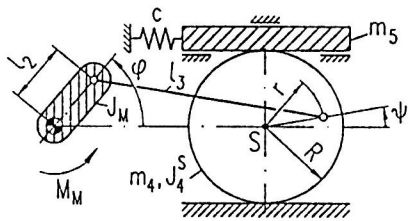
Greifer



Feder c bei  $s=l$  entspannt

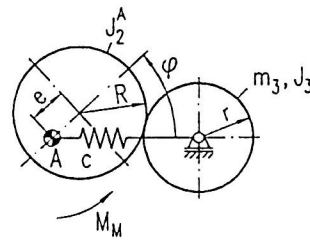
Druckmaschine

Feder c bei  $\psi = 0$  entspannt



$\psi (\varphi = 0) = 0$

Fadentransporteinrichtung

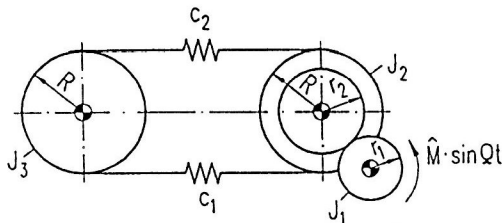


Feder c bei  $\cos \varphi = -1$  mit  $F_0$   
auf Zug vorgespannt

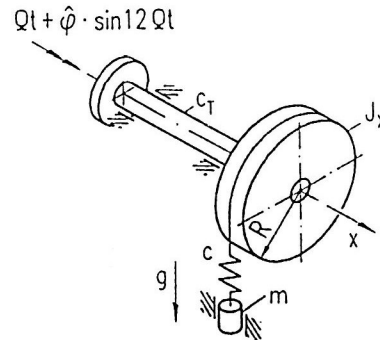
Bild 1. Beispiele für individuelle Aufgaben zur „starrten Maschine“

Bild 1 zeigt typische Aufgabenstellungen aus dem Gebiet der Mechanismendynamik. Alle Aufgaben haben den gleichen Schwierigkeitsgrad und verlangen dieselben Lösungsschritte. In diesem Falle sind dies die Aufstellung der (nichtlinearen) Zwangsbedingungen, die Berechnung des (stellungsabhängigen) reduzierten Massenträgheitsmomentes und die Berechnung des auf den Antrieb reduzierten Momentes, das aus einer Federkraft und/oder eingepreßten Kräften resultiert.

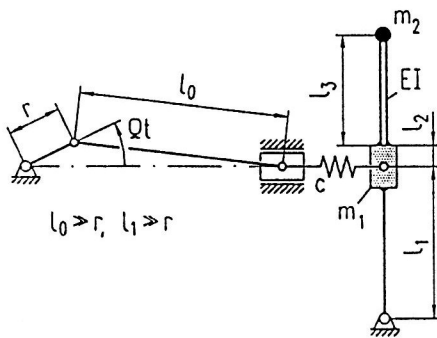
Keilriemengetriebe



Hebezeug mit Last



Presse mit Kompensator



PKW auf geriffelter Fahrbahn

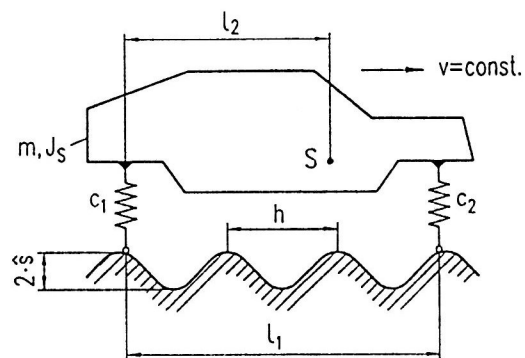


Bild 2. Beispiele für individuelle Aufgaben zum Komplex „Erzwungene Schwingungen bei Systemen mit  $f=2$ “

Bild 2 zeigt Beispiele von Schwingungen mit zwei Freiheitsgraden, die für Maschinenbauaufgaben charakteristisch sind. Jeder Schwinger hat eine andere Struktur, aber er enthält einheitlich eine harmonische Erregung (kinematische oder Kräfteerregter), führt auf zwei gekoppelte lineare Differentialgleichungen und erfordert die Berechnung von zwei Eigenfrequenzen und der Amplitudenfrequenzgänge.

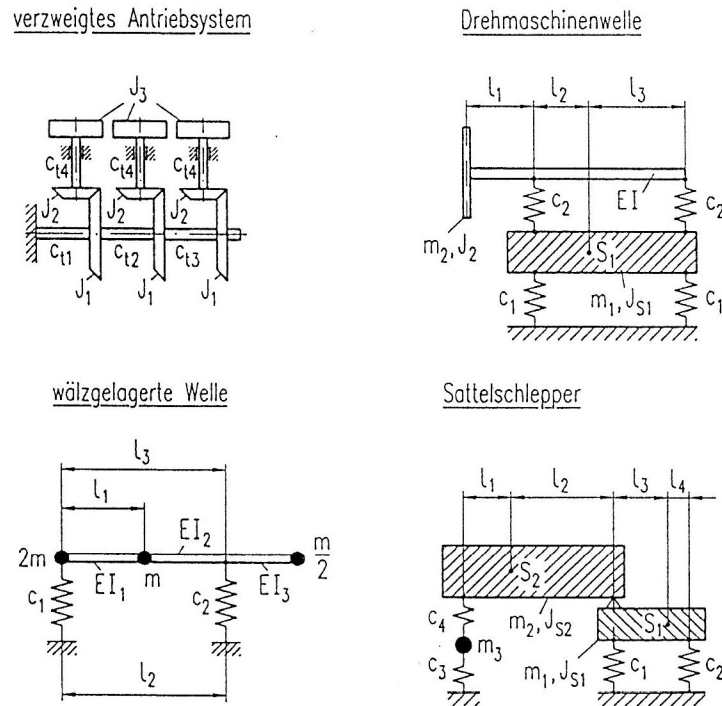


Bild 3. Beispiele für individuelle Aufgaben zum Komplex „Lineare Vielfachschwinger“

Bild 3 zeigt eine Auswahl von individuellen Aufgaben, die zum Komplex lineare Vielfachschwinger ausgegeben werden. Wie man sieht, ist analog zu den vorgenannten Aufgaben jedesmal eine Maschinen-Baugruppe angegeben, die dem jeweiligen Berechnungsmodell entspricht. Die Lösung der Aufgabe erfordert die Definition der Koordinaten (Festlegung des vieldimensionalen Koordinatenvektors), die Berechnung der Massenmatrix, der Federmatrix oder Nachgiebigkeitsmatrix in allgemeiner Form. Weiterhin sind reale Zahlenwerte für die Parameter von den Studenten zu schätzen und damit eine Berechnung der Eigenfrequenzen und Eigenformen vorzunehmen.

Mit solchen individuellen Belegaufgaben haben wir in den vergangenen Jahren gute Erfahrungen gemacht. Bei diesen Belegen muß sich jeder Student mit denselben Grundlagen befassen und diese auf jeweils eine andere technisch-mechanische Struktur anwenden. Außerdem muß er zu diesen Berechnungsmodellen, die Minimalmodelle von Maschinenbaugruppen darstellen, selbständig Parameterwerte wählen. Der Student wird dadurch veranlaßt, sich Gedanken über die Größe von realen Massen, von Schwerpunktlagen, Massenträgheitsmomenten, Federkonstanten, Beschleunigungszeiten, Eigenfrequenzen usw. zu machen. Auf manche Frage stößt der Studierende dabei von allein, wenn er zum Beispiel Federkonstanten für Kugellager, Keilriemen, Zahnräder oder Schraubverbindungen sucht. Es wird damit bezweckt, das ingenieurmäßige Denken zu stimulieren, welches bei rein abstrakten Schwingungs-Modellen nicht gefordert würde.

Es hat sich herausgestellt, daß beim Vergleichen der Lösungswege die Studenten „auf höherem Niveau“ Erfahrungen austauschen, sich beim Diskutieren der Fachterminologie bedienen lernen und sich somit in das Gebiet mit größerem Interesse einarbeiten als in früheren Jahren, wo häufig Lösungen der Übungsaufgaben nur von einander abgeschrieben wurden.

Eine aktuelle Frage besteht darin, wie man moderne Finite-Elemente-Methode- und Mehrkörpersysteme-Software in die Lehrveranstaltung einbeziehen soll. Es reicht in der Vorlesung die Zeit nur dazu, die Leistungsfähigkeit solcher modernen Programme zu erläutern, zum Beispiel mit Folien von Berechnungsmodellen und Berechnungsergebnissen. Zur Signalanalyse, zur Berechnung von Mechanismen, zur Berechnung von Eigen-

frequenzen und Eigenformen der linearen Schwingungssysteme u.a. können die Studenten auf Wunsch Software benutzen, die am Lehrstuhl zur Verfügung steht. Diese nutzen aber nur wenige, interessierte Studenten. Es kann nicht die Aufgabe dieser Vorlesung (im 5. Semester) sein, auf die umfangreichen Anwenderbeschreibungen moderner Software einzugehen. Die Erfahrung hat gezeigt, daß sich die Studenten im Fachstudium bei der Bearbeitung größerer konstruktiver Belege (im 8. bis 9. Semester) in solche Programmsysteme gern und schnell einarbeiten. Nach dem bei uns üblichen 20-wöchigen Ingenieurpraktikum im 7. Semester ist die Motivation der Studierenden vorhanden, sich mit derartigen Finite-Elemente-Methode- und Mehrkörpersysteme-Programmen zu befassen.

Parallel zum Übungsbetrieb finden 5 Praktikumsversuche in unserem Maschinendynamik-Labor statt. Dadurch werden die Studenten mit Fragen und Problemen der Schwingungsmeßtechnik und der Meßmethodik bekannt gemacht. Die einzelnen Laborversuche werden von kleinen Gruppen von 3 bis 5 Studenten ausgeführt und werden aus folgenden acht Komplexen ausgewählt:

- Bestimmung der dynamischen Kennwerte des starren Körpers
- Auswuchten starrer Körper
- Kennwertermittlung für einen einfachen linearen Schwinger mit Massenkrafterregung (elastisch gestützter Motorradmotor)
- Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen eines Balkens
- Methoden der Signalanalyse
- biegekritische Drehzahlen einer mit einer Scheibe besetzten Welle (Gleich- und Gegenlauf, Kreiselwirkung, Anisotropie)
- Messung von Maschinengeräuschen (Industrienähmaschine)
- Fundamentierung/Schwingungstilgung

Es wird besonderer Wert darauf gelegt, typische dynamische Effekte an Baugruppen von realen Maschinen zu demonstrieren. Im Laufe der Zeit haben uns verschiedene Firmen dynamisch interessante Objekte zur Verfügung gestellt, an denen praxisnahe Untersuchungen vorgenommen werden können, z.B.

- Schrittgetriebe (Schwingungserregung im Abtrieb, höhere Harmonische)
- Webmaschine (dynamische Größen von Mechanismen)
- Deckelwegschläger (minimale Schwingungserregung durch HS-Profile von Kurvenscheiben)
- Industrienähmaschine

Darüberhinaus können alle Studenten einige Modelle in Betrieb setzen, die im Schaukasten jedem zugänglich sind, z.B.

- Torsionsschwinger: Eigenfrequenzen, Eigenformen
- Biegeschwinger: Eigenfrequenzen, Eigenformen
- Unwuchterregtes Fundament: Resonanz

## **5 Zur Prüfung**

Die Voraussetzung zur Teilnahme an der Prüfung ist, daß der Student seine drei individuellen Belegaufgaben gelöst und fünf Versuche im Praktikum erfolgreich absolviert hat.

Der Abschluß im Fach Maschinendynamik erfolgt durch eine schriftliche Prüfung über 4 Stunden (240 min), wobei diese zweigeteilt ist: im ersten Teil (90 min) werden Fragen zum Fachgebiet gestellt, die ohne Unterlagen zu beantworten sind. Im zweiten Teil muß der Student selbständig drei Aufgaben lösen, die dem Schwierigkeitsgrad der Übungsaufgaben entsprechen, wobei alle Unterlagen (auch Fachliteratur) zugelassen sind. In Vorbereitung auf die Prüfung werden 100 Fragen ausgegeben, so daß eine gezielte Beschäftigung mit den inhaltlichen Problemen des Fachgebietes möglich ist. Mit diesen Fragen ist gewissermaßen auch der vermittelte Stoff definiert. Ich stelle mit der Publikation dieser Liste auch die Frage, „was der Student wissen und können soll“ zur Diskussion (Tabelle 3).



Tabelle 3. 100 Fragen zur Vorbereitung auf die Prüfung Maschinendynamik

1. Was versteht man unter dem Modell einer starren Maschine?
2. Wie lautet die Bewegungsgleichung für die starre Maschine mit einem Freiheitsgrad?
3. Berechnen Sie die kinetische Energie eines speziellen Systems starrer Körper bei ebener Bewegung (vergleiche dazu Bild)!
4. Skizzieren Sie den Verlauf des reduzierten Massenträgheitsmomentes einer Kurbelschwinge über zwei Perioden!
5. Was versteht man unter Ungleichförmigkeitsgrad?
6. Welche positiven bzw. negativen Wirkungen hat ein Schwungrad im Antriebssystem?
7. Warum ist die Winkelgeschwindigkeit bei einem ungleichmäßig übersetzenden starren Getriebe im Leerlauf nicht konstant?
8. Unter welchen Bedingungen kann man aus dem Verlauf des reduzierten Massenträgheitsmomentes unmittelbar auf den Ungleichförmigkeitsgrad schließen? Geben Sie dazu Formeln an!
9. Was versteht man unter Massenausgleich von Mechanismen?
10. Warum kann man für ein Schubkurbelgetriebe durch Anbringen von rotierenden Unwuchten keinen vollständigen Massenausgleich erzielen?
11. Wie verändern sich die Massenkräfte beim Modell einer starren Maschine mit der Drehzahl?
12. In welchen Fällen ist an Stelle des vollständigen Ausgleichs der harmonische Ausgleich von Massenkräften zu empfehlen?
13. Skizzieren Sie drei Beispiele für den harmonischen und den vollständigen Ausgleich der Massenkräfte!
14. Was versteht man unter Auswuchten?
15. Was ist bei der Konstruktion von Rotoren bezüglich des Auswuchtens zu beachten?
16. Skizzieren Sie, wieviel und an welchen Stellen Ausgleichsebenen zum dynamischen Auswuchten eines starren Rotors benötigt werden?
17. Was versteht man unter „wegmessenden“ und „kraftmessenden“ Auswuchtmaschinen? Skizzieren Sie das Meßprinzip!
18. Welche Kenngrößen charakterisieren die Trägheitseigenschaften eines starren Körpers? Wieviel sind es bei ebener, wieviel bei räumlicher Bewegung?
19. Nennen Sie zwei Methoden zur experimentellen Bestimmung von Massenträgheitsmomenten!
20. Skizzieren Sie das Spektrum der Vertikalkraft eines zyklisch arbeitenden n-gliedrigen Koppelgetriebes!
21. Leiten Sie die Bewegungsgleichungen für ein gegebenes System mit 2 oder 3 Freiheitsgraden ab und formulieren Sie die zugehörigen Anfangsbedingungen (dazu Skizze)!
22. Skizzieren Sie einen Regler, mit dem man die Vibration eines Fahrersitzes reduzieren kann!
23. Wie kann man den Dämpfungsgrad eines schwingungsfähigen Systems mit einem Freiheitsgrad aus der Ausschwingkurve und aus der Hystereseurve ermitteln?
24. Skizzieren Sie den Zeitverlauf des durch einen Anfangsimpuls angeregten linearen Einfeldschwingers bei geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung!
25. Skizzieren Sie über drei Perioden die Schwingbewegung eines Feder-Masse-Systems, die durch einen Kraftsprung hervorgerufen wird!
26. Wie lautet die Bewegungsgleichung für erzwungene Schwingungen eines linearen Einfeldschwingers und deren stationäre Lösung bei harmonischer Krafterregung?
27. Was versteht man unter einer Fourier-Reihe? Geben Sie die Gleichung dafür an und beschreiben Sie die Terme mit Fachbegriffen!
28. Skizzieren Sie den Zeitverlauf der Stützkraft eines Fundamentes, das periodisch erregt wird, bei drei typischen (selbst zu benennenden) Drehzahlen!
29. Formulieren Sie die Bewegungsgleichung für einen kinematisch (Fußpunkt-) erregten Schwinger sowohl für die Relativkoordinate als auch für die Absolutkoordinate!
30. Erläutern Sie für einen linearen gedämpften Einfeldschwinger die Begriffe Ortskurve, Amplitudenfrequenzgang und Phasenfrequenzgang!
31. Skizzieren Sie den Amplitudenfrequenzgang eines gedämpften Einfeldschwingers bei periodischer Krafterregung mit drei Harmonischen!
32. Welcher Zusammenhang besteht bei einer halbsinusförmig verlaufenden Stoßkraft zwischen deren Maximalwert, der Stoßdauer und den Parametern des Einfeldschwingers?
33. Erläutern Sie den Amplitudenfrequenzgang eines linearen Einfeldschwingers mit Unwuchterregung!
34. Eine starre Maschine erhält eine elastische Lagerung. Unter welchen Umständen sind die Kräfte, die von dieser Maschine ins Fundament geleitet werden, größer oder kleiner als die Massenkräfte der starr gelagerten Maschine?
35. Wovon hängt die Größe einer Resonanzamplitude bei erzwungenen Schwingungen ab?
36. Was versteht man unter Schwingungsisolierung?
37. Geben Sie eine einfache Beziehung für die Eigenfrequenz eines einfachen Feder-Masse-Systems an, wenn die statische Durchsenkung infolge Eigengewicht bekannt ist!
38. Durch welche Maßnahmen kann man die dynamische Fundamentkraft einer Maschine vermindern? Skizzieren Sie den Verlauf einer Stützkraft als Funktion der Drehzahl beim Modell „starre Maschine“ im Vergleich zum Modell „linear elastische Maschine“!
39. Was versteht man unter Effektivwert eines zeitlich periodisch veränderlichen Antriebsmomentes?
40. Ein Torsionsschwinger mit zwei Freiheitsgraden wird durch ein harmonisches Moment zu Schwingungen erregt. Mit welcher Frequenz schwingt er im stationären Zustand?

41. Im Betriebsdrehzahlbereich einer Maschine wurden torsionskritische Drehzahlen von 720, 825, 960, 1080 und 1150 U/min festgestellt. Die Eigenfrequenzen lagen bei  $f_1 = 36$  Hz und  $f_2 = 96$  Hz. Wie sind die kritischen Drehzahlen erklärlich?
42. Gegeben sei ein periodischer Zeitverlauf eines Torsionsmomentes. Mittels welcher Methode sind die einzelnen Frequenzanteile dieses Signals bestimmbar?
43. Skizzieren Sie einen harmonisch erregten Schwinger mit Tilger!
44. Skizzieren Sie einen Torsionsschwinger, dessen erste Eigenfrequenz gleich Null ist!
45. Wie ändern sich die Eigenfrequenzen eines sich in Bewegung befindlichen Antriebssystems, nachdem die Bremse den Antrieb festhält?
46. Skizzieren Sie die ersten beiden Eigenschwingungsformen eines gegebenen Torsionsschwingers (dazu Bild)!
47. Skizzieren Sie die Drehmoment-Winkel-Kennlinie einer spielbehafteten elastischen Kupplung!
48. Ein Biegeschwinger wird durch eine Erregung mit konstanter Frequenz zu Resonanzschwingungen angeregt. Geben Sie mindestens drei Maßnahmen zur Verkleinerung der Schwingungsamplitude an!
49. Warum ist man bestrebt, die kritische Drehzahl einer Zentrifuge möglichst tief zu legen?
50. Was versteht man unter Selbstzentrierung eines elastischen Rotors?
51. Wieviel Biege-Eigenfrequenzen hat eine nicht rotierende Welle, die mit einer Punktmasse und einer Scheibe besetzt ist?
52. Erläutern Sie die Anfangsbedingungen eines Biegeschwingers (dazu Skizze)!
53. Erläutern Sie, wie sich die Eigenfrequenzen eines einfachen Rotors (masselose Welle mit Scheibe) infolge der Kreiselwirkung mit der Drehzahl ändern!
54. Wann ist bei einem Rotor der Einfluß der Kreiselwirkung von Bedeutung und wann kann er vernachlässigt werden?
55. Unter welchen Voraussetzungen ist ein Rotor beim Auswuchten als starr bzw. elastisch zu behandeln?
56. Welchen Einfluß hat die Lagerelastizität auf die Biegeeigenfrequenz eines Wellenstranges?
57. Wieviel Resonanzstellen können sich bei einem linearen System mit  $n$  Freiheitsgraden, auf das eine periodische Kraft mit  $k$  Harmonischen wirkt, ergeben?
58. Wie kann man entscheiden, ob zwei Resonanzstellen, die bei den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  beobachtet werden, von einem Einzelschwinger mit periodischer Erregung oder von einem harmonisch erregten Schwinger mit zwei Freiheitsgraden stammen?
59. Geben Sie die kinetische und potentielle Energie eines konkreten Systems mit zwei Freiheitsgraden an (dazu Bild)!
60. Was versteht man unter Eigenschwingungen einer Maschine?
61. Unter welchen Bedingungen schwingt ein System bei freien Schwingungen mit nur einer einzigen Eigenform?
62. Wie groß ist die gesamte mechanische Energie eines linearen, ungedämpften Systems mit  $n$  Freiheitsgraden nach einer einmaligen Anregung (charakterisiert durch die Anfangsbedingungen)?
63. Leiten Sie die Formeln für die Berechnung der Eigenfrequenzen für das skizzierte System mit zwei Freiheitsgraden ab (dazu Bild)!
64. Welche Anfangsbedingungen muß ein System erhalten, damit es nur mit seiner 3. Eigenfrequenz schwingt?
65. Mit welchen Frequenzen schwingt eine Maschine, die angestoßen wird? Erklären Sie dies für ein Berechnungsmodell mit einem und mit beliebig vielen Freiheitsgraden!
66. Wie beeinflusst die Dämpfung die freien Schwingungen eines linearen Mehrfachschwingers?
67. Skizzieren Sie die Ausschwingkurven eines linearen Systems mit zwei Freiheitsgraden (qualitativ)!
68. Unter welchen Bedingungen ist die resultierende Bewegung der freien Schwingungen eines Systems mit zwei Freiheitsgraden periodisch?
69. Welche Methoden sind für das Aufstellen der Bewegungsgleichungen eines Systems mit  $n$  Freiheitsgraden zweckmäßig?
70. Geben Sie die Bewegungsgleichungen eines linearen gedämpften Schwingungssystems in Matrixschreibweise an!
71. Geben Sie einen Lösungsansatz für die Eigenschwingungen eines linearen ungedämpften Systems an!
72. Wie läßt sich das System der Bewegungsgleichungen eines linearen konservativen Systems entkoppeln?
73. Was versteht man unter der Modalmatrix?
74. Unter welchen Bedingungen kann bei einem linearen Schwingungssystem von modaler Dämpfung gesprochen werden?
75. Was versteht man unter dem Superpositionsprinzip?
76. Wann ist bei einem periodisch erregten linearen Schwingungssystem der stationäre Betriebszustand erreicht?
77. Wie ist der Rayleigh-Quotient eines linearen konservativen Systems definiert?
78. Wie lautet das Eigenwertproblem für ein lineares ungedämpftes Schwingungssystem!
79. Nennen Sie den Lösungsansatz für die erzwungenen Schwingungen eines linearen Systems bei harmonischer Erregung!
80. Mit welcher Schwingungsform schwingt ein schwach gedämpftes Schwingungssystem, wenn es mit einer Erregerfrequenz erregt wird, die der 2. Eigenfrequenz entspricht?
81. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines linearen elastischen Systems?
82. Wie sind aus der potentiellen und kinetischen Energie eines diskreten linearen mechanischen Systems die Steifigkeits- und Massenmatrix bestimmbar?
83. Wie ändern sich die Eigenfrequenzen eines linearen Systems, wenn zusätzliche Verstreben oder zusätzliche Lagerstellen angeordnet werden?
84. Wie verändern sich die Eigenfrequenzen beim Anbringen einer Zusatzmasse an ein schwingungsfähiges System?
85. In einem schwingungsfähigen System wird die Steifigkeit einer Feder vergrößert. Welche Eigenfrequenzen ändern sich und wie?

86. Unter welchen Bedingungen verändert eine Zusatzmasse in einem System eine Eigenfrequenz nicht?
87. Erklären Sie, wie die modale Masse, modale Federkonstante und modale Erregerkraft berechnet werden!
88. Wie bestimmt man die  $2n$  Integrationskonstanten bei der Untersuchung freier Schwingungen eines linearen Systems mit  $n$  Freiheitsgraden?
89. Skizzieren Sie für einen modalen Schwinger die Abhängigkeit der Amplitude der Restschwingung in Abhängigkeit vom Verhältnis Anlaufzeit zu Periodendauer!
90. Ein ursprünglich statisch unbestimmtes Tragwerk wird durch Einführung von Drehgelenken so verändert, daß es statisch bestimmt wird.  
Wie ändern sich die Eigenfrequenzen infolge solch einer Maßnahme?
91. Unter welchen physikalischen Bedingungen wird eine Steifigkeitsmatrix singular?
92. Skizzieren Sie den Verlauf der Koordinate eines Schwingers zu Beginn der Resonanz für den ungedämpften Fall!
93. Wovon hängt es ab, ob ein plötzlicher Impuls als Dirac-Stoß behandelt werden kann?
94. In welchen Fällen ist es notwendig, die Dämpfung eines schwach gedämpften linearen Schwingungssystems zu berücksichtigen?
95. Was versteht man unter der „Bequemlichkeitshypothese“ (Rayleigh-Dämpfung)?
96. Wieviel Tilgungsfrequenzen hat ein Schwinger mit  $n$  Freiheitsgraden? Skizzieren Sie ein System und die dazugehörigen Amplituden-Frequenzgänge mit und ohne Tilger!
97. Wodurch können Nichtlinearitäten in Schwingungssystemen bedingt sein?
98. Nennen Sie mindestens drei Beispiele von VDI-Richtlinien oder DIN-Vorschriften auf dem Gebiet der Maschinendynamik!
99. Nennen Sie Software auf dem Gebiet der Mehrkörperdynamik (mindestens drei Programme)!
100. Nennen Sie Software, die sich zur Lösung von linearen Schwingungsproblemen eignet (mindestens drei Programme)!

## Literatur

1. Rahmenordnung für die Diplomprüfung im Studiengang Maschinenbau an Universitäten und gleichgestellten Hochschulen. Sekretariat der Kultusminister der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Bonn, (1991)
2. Bremer, H.: Dynamik und Regelung mechanischer Systeme, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, (1988)
3. Bremer, H.; Pfeiffer, F.: Elastische Mehrkörpersysteme. B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, (1982)
4. Dresig, H.; Rockhausen, L.: Aufgabensammlung Maschinendynamik. Fachbuchverlag, Leipzig-Köln, (1994)
5. Dresig, H.; Fischer, U.; Holzweißig, F.; Stephan, W.: Arbeitsbuch Maschinendynamik / Schwingungslehre. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1. Auflage (1982), 2. Auflage (1987)
6. Federn, K.: Auswuchttechnik. Band 1. Allgemeine Grundlagen, Meßverfahren und Richtlinien. Springer-Verlag, Berlin, (1977)
7. Fischer, U.; Stephan, W.: Mechanische Schwingungen. Fachbuchverlag Leipzig, 1. Auflage (1983), 3. Auflage (1993)
8. Hafner, K.E.; Maass, H.: Theorie der Triebwerksschwingungen der Verbrennungskraftmaschine. Springer-Verlag Wien/VEB Verlag Technik Berlin, (1984)
9. Hafner, K.E.; Maass, H.: Torsionsschwingungen in der Verbrennungskraftmaschine. Springer-Verlag Wien/VEB Verlag Technik Berlin, (1985)
10. Hagedorn, P.; Otterbein, S.: Technische Schwingungslehre. Springer-Verlag, Berlin, (1987)
11. Hagedorn, P.: Technische Schwingungslehre. Band 2, Lineare Schwingungen kontinuierlicher mechanischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin, (1989)
12. Holzweißig, F.; Meltzer, G.: Meßtechnik der Maschinendynamik. Fachbuchverlag, Leipzig, 2. Auflage (1978)
13. Holzweißig, F.; Dresig, H.: Lehrbuch der Maschinendynamik. 1. Auflage (1979), Springer-Verlag, Wien, 4. Auflage (1994), Fachbuchverlag, Leipzig-Köln

14. Knaebel, M.: Technische Schwingungslehre. B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, 4. Auflage (1987)
15. Krämer, E.: Maschinendynamik. Springer-Verlag, Berlin, (1984)
16. Laschet, A.: Simulation von Antriebssystemen. Springer-Verlag, Berlin, (1984)
17. Lingener, A.: Auswuchten - Theorie und Praxis. Verlag Technik GmbH, Berlin-München, (1992)
18. Maass, H.; Klier, H.: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine. Springer-Verlag, Wien, (1981)
19. Marguerre, K.; Wölfel, H.: Technische Schwingungslehre. Bibl. Institut, Mannheim/Wien/Zürich, (1979)
20. Müller, P.C.; Schiehlen, W.O.: Lineare Schwingungen. Akademische Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, (1976)
21. Popp, K.; Schielen, W.O.: Fahrzeugdynamik. B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart-Leipzig, (1993)
21. Schiehlen, W.O.: Technische Dynamik. B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, (1986)
22. Waller, H.; Krings, W.: Matrizenmethoden in der Maschinen- und Bauwerksdynamik, Bibliographisches Institut, Wien/Zürich, (1975)
23. Waller, H.; Schmidt, R.: Schwingungslehre für Ingenieure. Wissenschaftsverlag, Mannheim /Wien/ Zürich, (1989)
24. Ziegler, G.: Maschinendynamik. 3. Auflage, Essen: Workshop-Verlag für Wissenschaften, (1990)
25. Studienordnung für den Studiengang Maschinenbau an der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau. Juni (1994)

---

*Anschrift:* Prof. Dr.-Ing. habil. H. Dresig, Institut für Mechanik i.G., Technische Universität Chemnitz-Zwickau, D-09107 Chemnitz