

HANSER



Leseprobe

zu

„Technische Mechanik für Ingenieure“

von Wolfgang H. Müller und Ferdinand Ferber

Print-ISBN: 978-3-446-46117-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-46118-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46117-8>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 1. Auflage

Why, anybody can have a brain. That's a very mediocre commodity. Every pusillanimous creature that crawls on the Earth or slinks through slimy seas has a brain. Back where I come from, we have universities, seats of great learning, where men go to become great thinkers. And when they come out, they think deep thoughts and with no more brains than you have. But they have one thing you haven't got: a diploma.

Frank Morgan in 'The Wizard of Oz', 1939

Unser Buch zu den Grundlagen der Technischen Mechanik ist das Resultat von Vorlesungen über viele Jahre, die wir an der Universität Paderborn, der Heriot-Watt University in Edinburgh und seit neuestem auch an der Technischen Universität Berlin gehalten haben. Letztendlich jedoch geht der Text auf Ideen und Anregungen zurück, die aus den Notizen und Vorlesungen von Herrn Professor Helmut Wild / Paderborn stammen. Ihm sei an dieser Stelle besonders herzlich gedankt. Der hier präzentierte Stoff bietet Material für das Ingenieurgrundstudium an deutschsprachigen Universitäten und Technischen Hochschulen und deckt sich mit dem Inhalt der einsemestrigen Veranstaltungen Mechanik A (Statik) und Mechanik B (elementare Festigkeitslehre), wie sie an der Universität Paderborn Studenten des Maschinenbaus hören, sowie der einsemestrigen Vorlesungen Mechanik 1 (Einführung in die Statik und Festigkeitslehre), Mechanik 2 (Reibung, Stabilität, elementarer Energiesatz, Massenpunkt- und 2D-Starrkörperdynamik, Schwingungen) und schließlich Mechanik 3 (Kontinuumsmechanik, insbesondere Grundlagen der Elastizitätstheorie, Kontinuumschwingungen und Hydromechanik sowie Energieprinzipie und höhere Dynamik), wie sie für Studenten des Maschinenbaus, des Verkehrswesens und der Physikalischen Ingenieurwissenschaft an der Technischen Universität in Berlin derzeit vorgeschrieben sind.

Viele waren an der Entstehung dieses Buches sowie der begleitenden Software aktiv beteiligt, Studenten, Assistenten, technisches und nicht-technisches Personal. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht vollendet worden. Ein besonderes Dankeschön gilt den Helfern aus jüngster Zeit, Karin Bethke, Dipl.-Ing. (FH) Guido Harneit, Berrit Krahl, cand. ing. Manuela Krüger sowie Ingenieur Hadi Sawan, cand. ing. Torsten Schneider und Ingenieur Firas Seifaldeen. Die Erstellung der CD erfolgte durch cand. Wirt.-Ing.'s Isabel Koke, Volker Huneke sowie Herrn Ludger Merkens. Aufgaben zum Dynamikteil sind auf der CD im Moment nur rudimentär vorhanden. Dass hierzu überhaupt Material existiert, ist Herrn Dipl.-Math. Stefan Neumann von der Universität Paderborn zu verdanken. Herrn Kollegen Prof. Dr.-Ing. Albert Duda ist für die kritische Durchsicht des Manuskripts und viele Verbesserungsvorschläge zu danken.

Unter den angehenden Ingenieuren ist die Technische Mechanik ein notorisch unbeliebtes Studienfach. Nicht zuletzt aufgrund der ihr eigenen mathematisch-formalen Struktur gilt sie als „theoretisch“ und „unpraktisch“, ja, bei nicht wenigen ist sie sogar als „altmodischer“, den Erfordernissen modernen Ingenieurwesens nicht länger gerecht werdender Ballast verschrien. Dies ist jedoch ein Irrtum, denn die tägliche Ingenieurpraxis zeigt, dass neue Konstruktionen, im Mikro- wie im Makrobereich, zur Bestimmung ihrer Zuverlässigkeit die klassischen Konzepte der Mechanik benötigen und sich die Totgesagte somit bester Gesundheit erfreut und bei der Herstellung besserer technischer Produkte hilft. Die Konzepte der Technischen Mechanik zu kennen, zu beherrschen und anzuwenden ist leider nur durch Übung möglich. Dies erfordert Geduld und Ausdauer und zwar von beiden Seiten, den Lernenden *und* den Lehrenden. Zum

Trost sollten die Studenten bedenken, dass am Ende der geistigen Anabasis auch ihnen als Lohn ein Diplom winkt, dessen Bedeutung für unser Leben schon der Wizard of Oz richtig einzuschätzen wusste.

Überhaupt, dass der angehende Ingenieur es nicht immer leicht hat, wurde bereits von Thomas Mann in seinem Roman „Der Zauberberg“ bemerkt. So erwähnt eine der Hauptfiguren des Romans, Hans Castorp, zu seinem behandelnden Arzt, Dr. Krokowski, beiläufig, dass er gerade sein Examen bestanden hätte: *„Was für ein Examen haben Sie abgelegt, wenn die Frage erlaubt ist?“* *„Ich bin Ingenieur, Herr Doktor“, antwortete Hans Castorp mit bescheidener Würde. „Ah, Ingenieur!“ Und Dr. Krokowskis Lächeln zog sich gleichsam zurück, büßte an Kraft und Herzlichkeit für den Augenblick etwas ein. „Das ist wacker. Und Sie werden hier also keinerlei ärztliche Behandlung in Anspruch nehmen, weder in körperlicher noch in psychischer Hinsicht?“* *„Nein, ich danke tausendmal!“ sagte Hans Castorp und wäre fast einen Schritt zurückgewichen.*

Eines darf abschließend ohne zu zaudern festgestellt werden: Das *rechtzeitige* Studium dieses Buches inklusive Bearbeitung der auf der CD angebotenen Übungen *vor* der Klausur, bewahrt vor dem Zauberberg und der Inanspruchnahme ärztlicher, insbesondere psychiatrischer Hilfe.

Wolfgang H. Müller und Ferdinand Ferber im Sommer 2003

Vorwort zur 5. Auflage

Wenn dann die Schatten sich senken und all das Verfehlt und Ungeschehene und Ungetane mich ängstet ...
Thomas Mann, Rede an Katja Mann

Seit dem Erscheinen der vierten Auflage unseres Buches sind wieder viele tausend Studierende durch die Grundlagenveranstaltungen zur Technischen Mechanik gegangen. Dabei haben wir diverse Tippfehler entdeckt und nun eliminiert.

Außerdem, der mangelnden Unterrichtszeit und der Mode sei es geschuldet, wurde in der Neuauflage auf die Beschreibung diverser zeichnerischer Verfahren verzichtet und zwar insbesondere auf das Seileck und die MOHRsche Analogie bei der Bestimmung der Biegelinie. Interessierte sowie vehemente Verfechter dieser Methoden haben aber weiterhin die Möglichkeit, sich hierüber in den vorangegangenen Auflagen zu informieren.

Wie auch schon zuvor können mit grauer Berandung gekennzeichnete Seiten und Passagen beim ersten Lesen übergangen werden.

Abschließend gilt unser Dank noch allen unseren Assistenten Dr.-Ing. Emek Abali, Gregor Ganzosch, M.Sc., Sebastian Glane, M.Sc., Dr.-Ing Felix Reich, Wilhelm Rickert, M.Sc. und – seit Neuestem – Herrn Volker Herzberg vom Carl Hanser Verlag.

Wolfgang H. Müller und Ferdinand Ferber im Juli 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Statik	1
1.1	Grundbegriffe	1
1.1.1.	Zum Kraftbegriff	1
1.1.2	Einteilung der Kräfte, das Schnitt- und das Wechselwirkungsprinzip	3
1.2	Kräfte in einem Angriffspunkt	6
1.2.1	Zusammensetzen von Kräften	6
1.2.2	Zerlegen von Kräften in der Ebene: Komponentendarstellung	9
1.2.3	Gleichgewicht von Kräften in einem Angriffspunkt	12
1.2.4	Zentrale Kräftegruppe im Gleichgewicht: Haltekraft auf schiefer Ebene	14
	Lösung im kartesischen Koordinatensystem	14
	Vektorielle Berechnung der Haltekraft	15
1.2.5	Zentrale Kräftegruppe im Gleichgewicht: Verkettete Pendelstäbe	15
	Lösung im kartesischen Koordinatensystem	15
	Stabkräfte vektoriell berechnet	17
1.2.6	Zentrale Kräftegruppen im Raum und Vergleich mit zwei Dimensionen	18
1.3	Allgemeine Kräftesysteme: Gleichgewicht des starren Körpers	20
1.3.1	Moment beliebig verteilter Kräftegruppen in der Ebene	20
	Zwei zueinander parallele Kräfte	20
	Definition des Momentes einer Kraft	23
	Zum Gesamtmoment ebener Kräftesysteme	24
	Kräfte an einer Sechseckscheibe	24
	Beispiel: Das Moment eines Kräftepaares	24
1.3.2	Gleichgewichtsbedingungen für beliebige Kräftesysteme in der Ebene	26
1.3.3	Gleichgewicht illustriert an einem System von Pendelstäben	28
1.3.4	Vektorielle Deutung des Momentes	29
	Definition des Momentenvektors	29
	Bemerkungen zum Kreuzprodukt von Vektoren	30
	Ein Quader unter dem Einfluss äußerer Kräfte	33

1.3.5 Allgemeine Kräftegruppen im Raum	34
Zusammenfassung der Gleichgewichtsbedingungen	34
Rahmen im Raum.....	35
1.4. Der Schwerpunkt.....	37
1.4.1 Schwerpunkt einer Gruppe paralleler Kräfte	37
1.4.2 Spezielle Linienkräfte (Streckenlasten): Gleichstrecken- und Dreieckslast	39
1.4.3 Massenschwerpunkt eines Volumens.....	40
1.4.4 Zum Flächenschwerpunkt	44
Flächenschwerpunkt eines Dreiecks	46
Flächenschwerpunkt einer Parabel.....	48
Flächenschwerpunkt eines Halbkreises.....	49
1.4.5 Zum Linienschwerpunkt	50
1.5 Lager, Trag- und Fachwerke.....	52
1.5.1 Freiheitsgrade, Lager und ihre technische Realisierung	52
Einwertige Lager	52
Zweiwertige Lager	52
Dreiwertige Lager	53
1.5.2 Tragwerke.....	54
1.5.3 Fachwerke	55
Definition des idealen Fachwerks	55
Prinzipielle Berechnung der Stabkräfte: Knotenpunktverfahren	57
Der RITTERSche Schnitt.....	59
1.6 Der biegesteife Träger	60
1.6.1 Schnittgrößen – Begriffsbildung	60
1.6.2 Zur Berechnung von Schnittgrößen am geraden Balken	62
Gerader Balken unter Einzellasten.....	62
Balken auf zwei Stützen unter Einzellast (Dreipunktbiegeprobe)	65
Kragträger unter Einzellast und Momentenwirkung.....	67
Zusammenhang zwischen Belastung und Schnittgrößen	68
Integration der Differentialgleichungen für Querkraft- und Momentenfläche.....	69
Randbedingungen für die Querkraft- und für die Momentenfläche.....	69

Übergangsbedingungen für die Querkraft- und für die Momentenfläche	70
Momentenfläche bei komplizierteren Belastungen	72
Ein vergleichendes Beispiel.....	74
1.6.3 Zur Berechnung von Schnittgrößen am Rahmentragwerk	78
Der rechtwinklige Rahmen	78
Beliebiger geknickter Träger	80
Der stetig gekrümmte Träger — Theorie	81
Ein Halbkreisbogen	83
1.7. Reibungsphänomene.....	84
1.7.1 Gleitreibung und Haftreibung.....	84
1.7.2 Reibung an der schiefen Ebene	88
1.7.3 Spezielle Anwendungen des Reibungsphänomens.....	90
Der PRONYSche Zaum (Reibungsbremse)	90
Schraube	92
Umschlingungsreibung.....	97
Seilbremse	98
Reibung am Keil.....	101
2 Festigkeitslehre.....	103
2.1 Einführung; Begriffe	103
2.1.1 Aufgabe der Festigkeitslehre	103
2.1.2 Beanspruchungsarten.....	104
2.1.3 Begriff der Spannung.....	105
2.2 Zug- und Druckbeanspruchung	107
2.2.1 Zug- und Druckspannung in Bauteilen.....	107
2.2.2 Beispiel: Spannungsverteilung in einem konischen Stab	109
2.2.3 Beispiel: Stab gleicher Festigkeit	110
2.2.4 Die Längenänderung des Zug- oder Druckstabes.....	111
2.2.5 Die Querdehnung des Zug- oder Druckstabes.....	114
2.2.6 Verformung statisch bestimmter Stabsysteme	115
2.2.7 Statisch unbestimmte Stabsysteme	116
2.2.8 Behinderte Wärmeausdehnung.....	118

2.3	Schubbeanspruchung und HOOKESches Gesetz.....	119
2.3.1	Spannungen infolge Schublast	119
2.3.2	Verformung infolge Schublast	119
2.4	Biegebeanspruchung des Balkens	120
2.4.1	Biegespannungsformel	120
2.4.2	Trägheits- und Widerstandsmomente für einfache Querschnittsformen	123
2.4.3	Satz von STEINER	125
2.4.4	Die Normalspannungen im Balken infolge Querkraftbiegung	128
2.5	Schub infolge Querkraft beim Biegeträger	130
2.5.1	Ingenieurformel für die Schubspannungen	130
2.5.2	Berechnung der Schubspannungen für spezielle Trägerformen	132
2.5.3	Schubspannungen im geschweißten, geklebten und genieteten Träger	134
2.5.4	Schubmittelpunkt	136
2.6	Die elastische Linie des Biegeträgers (Biegelinie).....	137
2.6.1	Die Differenzialgleichung der Biegelinie	137
2.6.2	Beispiel: Der eingespannte Balken	140
2.6.3	Beispiel: Träger auf zwei Stützen	141
2.6.4	Anwendung auf statisch unbestimmte Systeme	143
2.6.5	Ermittlung von Verformungen mit Hilfe des Superpositionsprinzips	144
2.6.6	Schiefe Biegung (Begriff der Hauptträgheitsachsen).....	145
2.7	Axiale Verdrehung/Torsion	151
2.7.1	Schubspannungen am Kreisquerschnitt	151
2.7.2	Polares Trägheitsmoment für Kreisprofile.....	153
2.7.3	Dünnwandige geschlossene Hohlprofile und dünnwandige offene Profile	154
2.7.4	Beliebige offene Profile, dickwandige Hohlprofile	157
2.7.5	Verformung infolge Torsion, Verdrehwinkel	158
	Spezifischer Winkel, Drehfederkonstante.....	160
	Darstellung des Torsionsmomentes (M_T -Fläche).....	160
2.8	Zusammengesetzte Beanspruchung.....	161
2.8.1	Einführung.....	161

2.8.2	Normalspannungen aus Normalkräften und Biegung	162
2.8.3	Schubspannungen aus Querkraft und Torsion	164
2.8.4	Begriff des Spannungstensors im ebenen Fall	165
2.8.5	Begriff des Spannungstensors im räumlichen Fall	169
2.8.6	Der MOHRsche Kreis	171
2.8.7	Vergleichsspannungen	177
2.8.8	Spannungstensor für den Balken	178
2.9	Stabilitätsprobleme	184
2.9.1	Einführung	184
2.9.2	Ein erstes Stabilitätsproblem	185
2.9.3	Zur Phänomenologie von Stabilitätsproblemen	186
2.9.4	Die EULERSche Knickgleichung	186
2.9.5	Die vier EULERSchen Knicktypen	189
3	Dynamik	193
3.1	Punktförmige Masse	193
3.1.1	Kinematik eines einzelnen Massenpunktes	193
	Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Eindimensionalen	193
	Beispiele zur eindimensionalen Bewegung	196
	Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Raum	202
	Koordinatensysteme	204
3.1.2	Kinetik des Massenpunktes	208
	Die NEWTONSchen Gesetze	208
	Dynamik des freien Massenpunktes	209
	Geführte Bewegungen	211
	Bewegungen unter dem Einfluss von Reibungskräften	215
3.1.3	Der Impulssatz	218
3.1.4	Energiesatz der Mechanik	221
3.1.5	Drehimpuls und Momentensatz	226
3.2	Die Dynamik von Massenpunktsystemen	226
3.2.1	Kinematik	226
3.2.2	Kinetik	228

3.2.3	Impuls- und Schwerpunktsatz für Massenpunktsysteme	230
3.2.4	Drehimpulssatz für Massenpunktsysteme	231
3.2.5	Der Energie- und Arbeitssatz für Massenpunktsysteme	235
3.2.6	Eine Anwendung des Impuls- und des Energiesatzes: zentrische Stöße zwischen kugelförmigen Massen	236
3.2.7	Körper mit zeitveränderlicher Masse	239
3.3	Die Dynamik des starren Körpers	242
3.3.1	Starrkörperkinematik	242
	Freiheitsgrade des starren Körpers	242
	Translation des starren Körpers	243
	Rotation des starren Körpers um eine feste Achse	244
	Allgemeine Bewegung des starren Körpers in der Ebene	246
	Zwei Beispiele zur Kinematik des starren Körpers	249
	Der Momentanpol	252
3.3.2	Starrkörperkinetik	253
	Einleitende Bemerkungen	253
	Rotation eines starren Körpers um eine feste Achse	253
	Ein Beispiel zur Aufstellung der Bewegungsgleichung von um eine feste Achse rotierenden Körpern	257
	Energie- und Arbeitssatz bei Rotation um eine feste Achse	258
	Weitere Beispiele zur Bewegung starrer Körper: Reibungsbremse und Walze	259
	Analogie zwischen der geradlinigen Bewegung eines Massenpunktes und der Starrkörperrotation um eine feste Achse	262
	Kinetik von ebenen starren Körpern (Scheiben)	263
	Beispiel I zur Starrkörperbewegung von Scheiben	265
	Beispiel II zur Starrkörperbewegung von Scheiben: Die ATWOODSche Fallmaschine	268
	Beispiel III zur Starrkörperbewegung von Scheiben: Das Jojo	269
	Beispiel IV zur Starrkörperbewegung von Scheiben	269
	Impuls-, Arbeits- und Energiesatz bei der Bewegung starrer Körper in der Ebene	272
	Ein Beispiel zum Energiesatz ebener starrer Körper	274

3.4	Schwingungen	276
3.4.1	Grundbegriffe der Schwingungslehre.....	276
3.4.2	Freie, ungedämpfte Schwingungen mit einem Freiheitsgrad	279
	Bewegungsgleichungen und ihre Lösung.....	279
	Alternativen und ergänzende Betrachtungen mit Hilfe des Energiesatzes	281
	Beispiele für die freie ungedämpfte Schwingung mit einem Freiheitsgrad	283
	Federkonstanten.....	284
3.4.3	Freie, gedämpfte Schwingungen mit einem Freiheitsgrad	288
	COULOMBreibung.....	288
	Geschwindigkeitsproportionale Reibung: Der lineare Dämpfer (Dashpot).....	289
	Ein komplizierteres Beispiel für eine Schwingung mit Dämpfung	294
3.4.4	Angefachte Schwingungen	295
	Angefachte Schwingungen ohne Dämpfung	295
	Angefachte Schwingungen mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung	298
3.4.5	Schwingungen mit endlich vielen Freiheitsgraden.....	302
	Motivation und Erinnerung	302
	Bewegungsgleichung der freien, ungedämpften Schwingung mit zwei Freiheitsgraden	303
	Erzwungene Schwingung mit zwei Freiheitsgraden	308
4	Kontinuumsmechanik	311
4.1	Bilanzgleichungen der Masse	311
4.1.1	Bilanzgleichung der Masse in globaler Form.....	311
4.1.2	Massendichte und Umschreibung der globalen Massenbilanz.....	312
4.1.3	LEIBNIZsche Regel zur Differentiation von Parameterintegralen und REYNOLDSsches Transporttheorem	314
4.1.4	Lokale Massenbilanz in regulären Punkten.....	318
4.1.5	Alternativschreibweisen der Massenbilanz in regulären Punkten; Endziel des Mechanikers	320
4.2	Bilanzgleichungen des Impulses	322
4.2.1	Bilanzgleichung des Impulses in globaler Form	322

4.2.2	Das CAUCHYSche Tetraederargument	325
4.2.3	Bilanzgleichung des Impulses in lokaler Form	326
4.2.4	Eine Bemerkung zum REYNOLDSschen Transporttheorem	328
4.3	Einfache Materialgleichungen	330
4.3.1	Das reibungsfreie Fluid	330
4.3.2	Das NAVIER-STOKES-Fluid	331
4.3.3	Der linear-elastische HOOKESche Körper	331
4.4	Bilanzgleichungen des Drehimpulses	336
4.4.1	Die lokale Bilanz des Drehimpulses	336
4.4.2	Die globale Bilanz des Drehimpulses	338
4.5	Einführung in die lineare Elastizitätstheorie	339
4.5.1	Der eindimensionale Zugstab neu gesehen	339
4.5.2	Die LAMÉ-NAVIERschen Gleichungen	341
4.5.3	Der axial schwingende Zugstab	346
4.5.4	Die Schwingungsgleichung der Geigensaite	348
4.5.5	Die Schwingungsgleichung einer Membran	352
4.5.6	Der transversal schwingende Balken	354
4.5.7	Lösungsmethoden I: Das Verfahren von D'ALEMBERT	355
4.5.8	Die Frage der Randbedingungen	360
4.5.9	Lösungsmethoden II: Das Verfahren von BERNOULLI	362
4.5.10	Zur Äquivalenz der Lösungsverfahren nach D'ALEMBERT und BERNOULLI	369
4.6	Einführung in die Hydromechanik	372
4.6.1	Massenbilanz bei der Rohrströmung	372
4.6.2	Der hydrostatische Druck	375
4.6.3	Die BERNOULLISche Gleichung	376
4.6.4	Der Auftrieb nach ARCHIMEDES	378
5	Energiemethoden	381
5.1	Energiebilanzen	381
5.1.1	Lokale und globale Bilanz der kinetischen Energie	381
5.1.2	Zum Begriff der inneren Energie	383
5.1.3	Gesamtbilanz der Energie oder Energieerhaltungssatz	383

5.1.4 Bilanz der inneren Energie	386
5.1.5 Energiebilanz bei der Rohrströmung.....	388
5.2 Entropiebilanz und zweiter Hauptsatz	389
5.2.1 Globale und lokale Entropiebilanz	389
5.2.2 Die GIBBSSche Gleichung.....	391
5.2.3 Eine Anwendung der GIBBSSchen Gleichung: Gummielastizität vs. HOOKESches Gesetz.....	393
5.3 Die Sätze von Castigliano, Betti und Maxwell.....	400
5.3.1 Potenzialcharakter von Formänderungsenergie, komplementärer Formänderungsenergie, freier Energie und freier Enthalpie	400
5.3.2 Die Formänderungsenergiegedichte linear-elastischer Körper	404
5.3.3 Komplementäre Formänderungsenergiegedichte linear-elastischer Körper.....	407
5.3.4 Formänderungsenergiegedichte für Balken.....	408
5.3.5 Formänderungsenergie in der Elastostatik	410
5.3.6 Die Sätze von MAXWELL und BETTI	411
5.3.7 Anwendung der Sätze von BETTI und MAXWELL auf statisch bestimmte und unbestimmte Systeme	415
5.3.8 Die Sätze von CASTIGLIANO für diskret belastete Systeme.....	418
5.3.9 Eine Anwendung der Sätze von CASTIGLIANO auf ein statisch bestimmtes System	420
5.4 Energiefunktionale und ihre Extrema	421
5.4.1 Eine erste Motivation zur Minimierung von Energieausdrücken.....	421
5.4.2 Hinführung zur Variationsrechnung.....	423
5.4.3 Die EULERSche Variationsgleichung	425
5.5 Das Prinzip der virtuellen Verschiebungen (PdvV)	429
5.5.1 Das PdvV in der elementaren technischen Mechanik	429
5.5.2 Das PdvV in der höheren technischen Mechanik.....	431
5.5.3 Das PdvV vom Standpunkt der Variationsrechnung.....	434
5.5.4 Das PdvV – Statik starrer Systeme.....	436
5.5.5 Beispiele zum PdvV in der Statik starrer Systeme	437
Berechnung von Kräften und Momenten	437
Berechnung von stabilen Lagen	440
Das Prinzip von TORRICELLI	441

Der GERBERträger	441
5.5.6 Das PdvV – Statik deformierbarer Systeme.....	442
5.5.7 Ein Beispiel zum PdvV in der Statik deformierbarer Systeme	443
5.5.8 PdvV – Allgemeine Belastungsfälle für HOOKEsche Balken.....	446
5.5.9 PdvV – Die Näherungsmethoden nach RITZ und GALERKIN	450
5.6 Das Prinzip der virtuellen Kräfte (PdvK)	454
5.6.1 Formulierung des PdvK im Rahmen der elementaren und höheren technischen Mechanik	454
5.6.2 Das PdvK vom Standpunkt der Variationsrechnung.....	457
5.6.3 Beispiele zum PdvK	459
Verschiebungen in einem statisch bestimmten System.....	459
Lagerreaktionen in einem statisch unbestimmten System	460
5.6.4 Eine rezeptmäßige Auswertung des PdvK: das 1-Kraft-Konzept.....	462
5.7 Dynamische Energieprinzipie.....	466
5.7.1 Das D’ALEMBERTSche Prinzip in LAGRANGEScher Fassung	466
5.7.2 Ableitung der Bewegungsgleichung des starren Körpers mit Hilfe des D’ALEMBERTSchen Prinzips in LAGRANGEScher Fassung	468
5.7.3 Ein Beispiel zum D’ALEMBERTSchen Prinzip in LAGRANGEScher Fassung.....	476
5.7.4 Das HAMILTONSche Prinzip und die LAGRANGEFunktion	478
5.7.5 Generalisierte Koordinaten	480
5.7.6 Die EULER-LAGRANGESchen-Bewegungsgleichungen	481
5.7.7 Beispiel I zu den EULER-LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen: Geführte Punktmasse.....	483
5.7.8 Beispiel II zu den EULER-LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen: Massenpunktsystem mit zwei generalisierten Koordinaten	484
5.7.9 Beispiel III zu den EULER-LAGRANGESCHEN Bewegungsgleichungen: Mehrere Punktmassen im Verbund	486
5.7.10 Beispiel IV zu den EULER-LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen: Punktmassen und starrer Körper im Verbund	488
5.7.11 Beispiel V zu den EULER-LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen: Konservative Starrkörperbewegung	489
5.7.12 Beispiel VI zu den EULER-LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen: Ein nicht konservatives System.....	491
5.7.13 Die LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen 1. Art	492
5.7.14 Beispiel I zu den LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen 1. Art.....	494

5.7.15 Beispiel II zu den LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen 1. Art.....	498
5.7.16 Klassifizierung kinematischer Bedingungen	499
5.7.17 Beispiele zu holonom rheonomen Nebenbedingungen.....	502
5.7.18 Die HAMILTONSchen Bewegungsgleichungen.....	504
5.7.19 Beispiel I zu den HAMILTONSchen Gleichungen: Wurf im Schwerefeld der Erde.....	508
5.7.20 Beispiel II zu den HAMILTONSchen Gleichungen: Der 1-D-Massenschwinger	510
Stichwort- und Namensregister	511

1 Statik

1.1 Grundbegriffe

1.1.1 Zum Kraftbegriff

Die Kraft ist eine sogenannte **primitive**, d. h. keiner weiteren Erklärung bedürftige Größe. Sie ist das Resultat geistiger Abstraktion, basierend auf unserer täglichen Erfahrung, wobei wir Kräfte nicht direkt beobachten können, sondern lediglich aus ihrer Wirkung auf ihre Existenz schließen. Man denke hierbei etwa an die Verformung einer Feder, an die Dehnung eines Stabes oder auch an die Muskelspannung, die wir fühlen, wenn wir Kräfte ausüben. Mit anderen Worten „Kraft“ ist der Name für die **Ursache** beobachteter **Wirkungen**.

Eine Kraft ist durch **drei** Eigenschaften bestimmt, durch ihren **Betrag**, ihre **Richtung** und ihren **Angriffspunkt**.

Der **Betrag** ist ein Maß für die Größe der wirkenden Kraft. Ein qualitatives Gefühl hierfür vermittelt die unterschiedliche Muskelspannung, die wir empfinden, wenn wir zum Beispiel verschiedene Körper heben. Wir bezeichnen den Betrag der Kraft mit dem Symbol F (von englisch *force*). Gemessen werden kann der Betrag F einer Kraft, indem man ihn mit der Schwerkraft, etwa mit geeichten Gewichten, vergleicht. Als Maßeinheit für den Betrag der Kraft verwendet man das **Newton** mit dem Kurzzeichen N. In der Technik benutzt man gern auch Vielfache der Einheit, wie beispielsweise das Kilonewton kN, was 1000 N entspricht.

Dass eine Kraft eine **Richtung** hat, ist auch intuitiv klar. Schließlich wirkt z. B. das Gewicht eines Körpers immer lotrecht nach unten, und es macht sicher einen Unterschied, mit welchem Winkel man bei betragsmäßig gleich bleibender Kraft auf einen Körper **drückt** oder an ihm **zieht** (siehe Abbildung 1.1.1).

Außerdem ist der **Angriffspunkt** der Kraft von Bedeutung, wie exemplarisch in Abbildung 1.1.1 zu sehen ist: Abhängig davon, wo sich der Angriffspunkt A der Kraft an der Kiste befindet, wird, trotz betragsmäßig gleich bleibender Kraft, eine unterschiedliche Wirkung auf die Kiste erzeugt.

Wir fassen diese intuitiv klaren Aussagen in folgendem Satz zusammen:

Die Kraft ist ein gebundener Vektor.

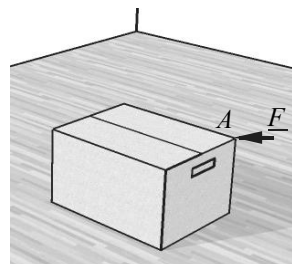
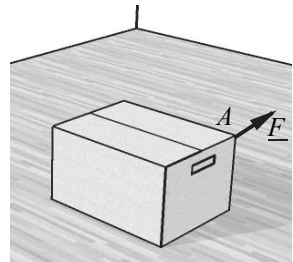
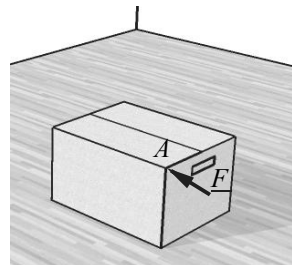
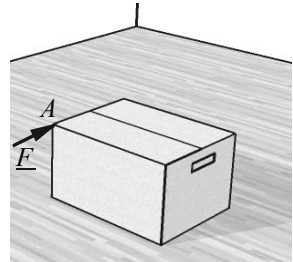
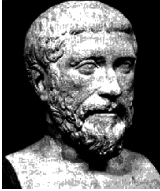


Abb. 1.1.1: Richtung und Angriffspunkt einer Kraft.



PYTHAGORAS VON SAMOS (580 – 500 v.u.Z.) war vornehmlich Philosoph und Mystiker mit einer starken Neigung zu Mathematik, Astronomie, Musik, Heilkunde, Ringkampf und der Politik. Durch Letzteres ereilt ihn im Jahre 532 vor Christus das Schicksal eines politischen Flüchtlings. Er verlässt Samos, um der dortigen Tyrannei zu entgehen, und zieht nach Süditalien. In Croton gründet er seine berühmte philosophische und religiöse Schule, und erschart Anhänger um sich, die sogenannten Pythagoreer. Der nach ihm benannte Satz war tausend Jahre zuvor bereits den Babyloniern bekannt gewesen und diente diesen praktischen Leuten zur Feldvermessung. PYTHAGORAS jedoch war vielleicht einer der Ersten, die sich auch für einen Beweis „seines“ Satzes interessierten. Über Details seiner eigenen wissenschaftlichen Arbeiten ist nicht allzu viel bekannt, denn die pythagoreische Schule gab sich erstens nach außen hin verschlossen und zweitens ist es bei Teams ja ohnehin nicht immer einfach, den konkreten Beitrag des Einzelnen auszumachen. Überhaupt glaubten die Pythagoreer zunächst einmal an die „Kraft der ganzen Zahl“ und hofften, Naturvorgänge durch harmonische Zahlenverhältnisse darstellen zu

Das Adjektiv **gebunden** bedarf einer näheren Erklärung: Einen **freien** Vektor kann man im Raum zu sich selbst beliebig parallel verschieben. Dieses ist bei einem Kraftvektor nicht erlaubt. Die Kraft ist an ihre **Wirkungslinie** gebunden und besitzt darüber hinaus einen klar zu spezifizierenden **Angriffspunkt**.

Entsprechend der in der Vektorrechnung üblichen Symbolik wollen wir für den Kraftvektor das Symbol \underline{F} verwenden. Der Betrag der Kraft ist durch das Symbol F (ohne Unterstrich) gekennzeichnet.

In Abbildung 1.1.2 ist ein Kraftvektor \underline{F} zu sehen, der in einem Punkt A eines Körpers im Raum angreift. Außerdem ist ein **rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem** eingezeichnet, das durch Einheitsvektoren \underline{e}_x , \underline{e}_y und \underline{e}_z aufgespannt wird. Die Indizes x , y und z kennzeichnen dabei die drei Raumrichtungen. Man sieht, dass der Kraftvektor gegen die drei Koordinatenachsen unter den Winkeln α , β und γ geneigt ist. Aus rechentechnischen Gründen ist es sehr oft günstig, den Kraftvektor hinsichtlich eines Koordinatensystems darzustellen, also aufzuspannen. Dazu projiziert man den Kraftvektor \underline{F} auf die drei aufeinander senkrecht stehenden Achsenrichtungen und erhält so die drei Vektoren \underline{F}_x , \underline{F}_y und \underline{F}_z . Hierfür kann man mit den zuvor erwähnten Einheitsvektoren \underline{e}_x , \underline{e}_y und \underline{e}_z schreiben:

$$\underline{F} = \underline{F}_x + \underline{F}_y + \underline{F}_z = F_x \underline{e}_x + F_y \underline{e}_y + F_z \underline{e}_z = (F_x, F_y, F_z). \quad (1.1.1)$$

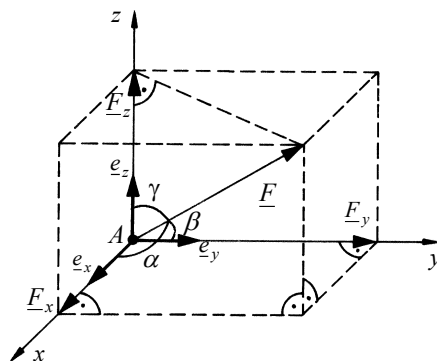


Abb. 1.1.2: Kraftvektor, im Raum aufgespannt im kartesischen Dreibein.

Dabei befolgen wir eine **Grundregel der Vektoraddition**, wonach gilt, dass Vektoren (hier \underline{F}_x , \underline{F}_y und \underline{F}_z) dadurch addiert werden, dass man bei der Addition das Ende des Vektors an den Kopf desjenigen Vektors hängt, zu dem er addiert werden soll. Man nennt die Größen F_x , F_y und F_z auch die **kartesischen Komponenten** des Vektors \underline{F} . Es ist üblich, sie in einer Zeile (F_x, F_y, F_z) (manchmal auch als Spalte geschrieben) zusammenzufassen. Merke, dass es sich dabei lediglich um alternative Schreibweisen ein- und desselben Objekts \underline{F} handelt. Man beachte, dass die Reihenfolge, in der das Aneinanderketten der Teilvektoren \underline{F}_x , \underline{F}_y und \underline{F}_z erfolgt, beliebig ist und immer zum gleichen Endresultat führt. Dies entspricht dem **Kommutativ-**(=Vertauschbarkeits-) **Gesetz** der Vektoraddition.

Nach dem **Satz des PYTHAGORAS** im Raum lässt sich der Betrag F des Vektors \underline{F} wie folgt durch die kartesischen Komponenten ausdrücken:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (1.1.2)$$

Schließlich kann man die Richtungswinkel α , β und γ mit den Komponenten und dem Betrag des Kraftvektors \underline{F} in Verbindung bringen:

$$\cos(\alpha) = \frac{F_x}{F}, \quad \cos(\beta) = \frac{F_y}{F}, \quad \cos(\gamma) = \frac{F_z}{F}. \quad (1.1.3)$$

Beide Gleichungen lassen sich mithilfe der Abbildung 1.1.2 beweisen.

1.1.2 Einteilung der Kräfte, das Schnitt- und das Wechselwirkungsprinzip

In der Mechanik ist es üblich, Kräfte nach verschiedenen Gesichtspunkten einzuteilen. Entsprechend haben sich diverse Begriffe eingebürgert, die man kennen sollte, um die einschlägige Literatur zu verstehen, und die im Folgenden erläutert werden (vgl. auch Abbildung 1.1.3).

Die **Einzellast**: Hierunter versteht man das idealisierte Konzept einer punktförmig angreifenden Kraft. Man könnte sie dadurch näherungsweise erzeugen, dass man den Körper mit einer Nadelspitze oder über einen dünnen Draht belastet.

Die **Linienkraft** oder **Streckenlast**: Hierbei handelt es sich um Kräfte, die entlang einer Linie kontinuierlich verteilt sind. Näherungsweise erzeugen lassen sie sich dadurch, dass man etwa mit

können, gleichgültig ob es sich dabei um astronomische oder musikalische Probleme handelte. Leider entdeckten sie bei ihren Forschungen, dass die Diagonale eines Quadrates nicht als rationales Vielfaches darstellbar ist, d. h., sie wurden plötzlich mit dem Phänomen der irrationalen Zahl konfrontiert. Dies gab bei ihnen und anderen griechischen Mathematikern zu größerer Unruhe Anlass, wie es bei Menschen, die mit Neuem konfrontiert werden, auch heute noch durchaus geschieht. Bemerkenswert scheint, dass die Ideen oder besser gesagt die Wunschvorstellungen der Pythagoreer bis zum Beginn der modernen Naturwissenschaften ihre Kraft behielten. So versuchte noch KEPLER in seinem Werk „Harmonices Mundi“ der Natur zunächst menschliche Harmonievorstellungen zu oktroyieren, verschrieb sich aber schließlich dann doch einer mehr rational geprägten Weltanschauung, wie seine Auswertung experimenteller Daten Tycho DE BRAHES bezeugt, was ihn schließlich auf die Bewegungsgesetze der Planeten brachte.

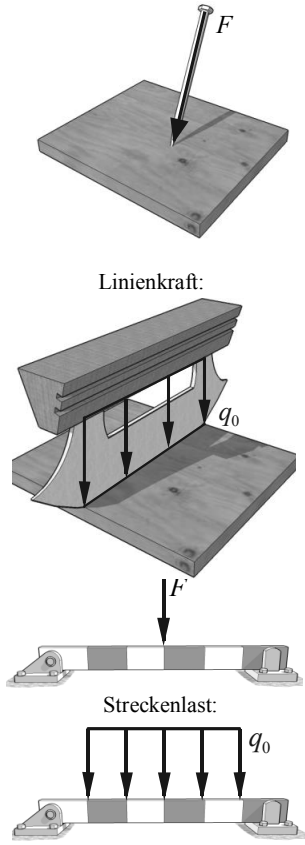


Abb. 1.1.3: Zum Begriff der Einzellast oder Linienkraft.

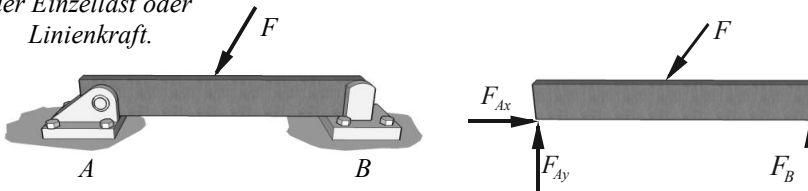


Abb. 1.1.4: Zum Begriff des Freischnitts.

einer dünnen Schneide oder einem Draht gegen einen Körper drückt.

Die **Volumenkraft**: Hierunter versteht man Kräfte, die über das Volumen eines Körpers angreifen, wie zum Beispiel das Gewicht oder elektromagnetische Kräfte.

Die **Oberflächenkraft**: Diese tritt in der Berührungsfläche zweier Körper auf. Beispiele sind der Wasserdruck auf eine Staumauer oder der Druck einer Panzerkette auf den Boden.

Eingeprägte Kräfte: Diese greifen in **vorgegebener** Weise an einem physikalischen System an, wie etwa das Gewicht oder der Druck einer Nadel auf die Oberfläche eines Körpers bzw. eine Schneelast auf einem Dach usw.

Reaktions- oder Zwangskräfte: Diese entstehen, wenn man einem durch eingeprägte Kräfte beeinflussten System seine Bewegungsfreiheit nimmt. Man denke an einen fallenden Stein, auf den nur sein eigenes Gewicht wirkt. Hält man den Stein in der Hand, so ist seine Bewegungsfreiheit eingeschränkt, indem man durch die Hand eine dem Gewicht entgegengesetzte Reaktions- bzw. Zwangskraft ausübt.

Reaktionskräfte lassen sich dadurch sichtbar machen, dass man den Körper von seinen geometrischen Bindungen löst, ihn sozusagen **freimacht** bzw. **freischneidet**. Diese in der Mechanik überaus wichtige Technik des Freischnitts soll im Folgenden an einem Beispiel erläutert werden.

Betrachte den in Abbildung 1.1.4 dargestellten Balken, der durch eine eingeprägte Kraft F belastet ist und auf zwei Stützen, den sogenannten Auflagern, ruht. Diese sind offensichtlich Bindungen, die den Balken an der Bewegung hindern, und wir befreien uns von ihnen, indem wir an ihrer Stelle zwei Reaktions- bzw. **Freischnittskräfte**, genannt $\underline{F}_A = (F_{Ax}, F_{Ay})$ und $\underline{F}_B = (0, F_B)$, anbringen. Dieses führt auf das **Freikörperbild** oder auch kurz den **Freischnitt**, der rechts in Abbildung 1.1.4 zu sehen ist.

Äußere und **innere** Kräfte: Wie der Name sagt, wirkt eine äußere Kraft von außen auf ein mechanisches System. Sowohl ein-

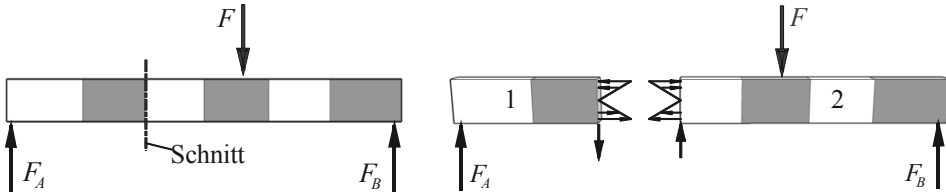


Abb. 1.1.5: Zum Begriff der inneren Kraft und des Schnittprinzips.

geprägte als auch Reaktionskräfte sind Beispiele äußerer Kräfte. Innere Kräfte erhält man durch gedankliches Zerteilen bzw. Schneiden des Körpers. Dieses ist in Abbildung 1.1.5 erläutert: Führt man durch den belasteten Körper einen Schnitt, so ist es, um das Gleichgewicht zu wahren, nötig, an Stelle der inneren Bindung durch das Material geeignete, flächenförmig verteilte, eben innere Schnittkräfte aufzuprägen.

Man beachte, dass die Einteilung in innere und äußere Kräfte davon abhängt, welches System untersucht wird. Fassen wir etwa den Gesamtkörper in Abbildung 1.1.5 als ein System auf, so sind die durch den Schnitt freigelegten Kräfte innere Kräfte. Betrachten wir dagegen die gezeichneten Teilkörper 1 oder 2 jeweils als ein System, so sind alle dargestellten Kräfte äußere Kräfte.



Abb. 1.1.6: Zum Wechselwirkungsgesetz, *actio = reactio-Prinzip*.

Im Zusammenhang mit dem Freischnitt von Kräften bzw. mit dem Schnittprinzip ist das sogenannte **Wechselwirkungsgesetz**, auch **actio = reactio-Prinzip**, von entscheidender Bedeutung. Es besagt, dass zu jeder Kraft immer eine gleich große, aber entgegengesetzte **Gegen-** bzw. **Reaktionskraft** gehört. Dieses aus der Erfahrung begründete Prinzip ist in Abbildung 1.1.6 il-

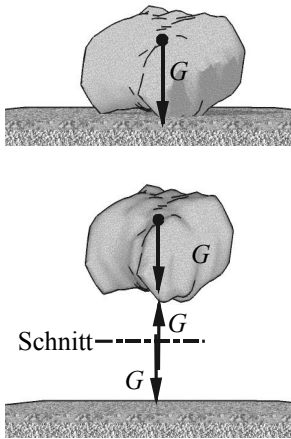


Abb. 1.1.7: Zum Wechselwirkungsgesetz, *actio = reactio*-Prinzip.

lustriert: Der gezeigte Drucklufthammer übt auf eine Wand eine Kraft F aus. Eine gleich große, aber entgegengesetzte Kraft wird aber auch von der Wand auf den Hammer ausgeübt. Beide Kräfte kann man dadurch sichtbar machen, dass man, wie gezeigt, an der Kontaktstelle freischneidet. Ein anderes Beispiel für das *actio=reactio*-Prinzip ist in Abbildung 1.1.7 gezeigt: Aufgrund der Gravitation hat ein Körper auf der Erde ein Gewicht G . Dieses ist die Anziehungskraft, welche die Erde auf ihn ausübt. Umgekehrt wirkt auch der Körper mit einer gleich großen, aber entgegengerichteten Kraft auf die Erde, beide Körper ziehen einander an.

actio = reactio: Die Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, sind gleich groß, entgegengesetzt gerichtet und liegen auf der gleichen Wirkungslinie.

Wir fassen zusammen: Im Folgenden stellen wir uns die Aufgabe, Reaktions- und Schnittkräfte für mechanische Systeme zu berechnen, um danach die ihnen unterworfenen Körper entsprechend ihrer Materialfestigkeit korrekt dimensionieren zu können.

1.2 Kräfte in einem Angriffspunkt

1.2.1 Zusammensetzen von Kräften

Betrachte Abbildung 1.2.1. Zwei Kraftvektoren, genannt \underline{F}_1 und \underline{F}_2 , greifen in einem Punkt A eines Körpers an. Die Erfahrung zeigt, dass diese Kräfte durch einen einzigen Kraftvektor \underline{R} , die sogenannte **Resultierende**, ersetzt werden können. Dieselbe ermittelt man dadurch, dass man, wie in Abbildung 1.2.1 zu sehen, die Kräfte zu einem Parallelogramm ergänzt. Die Diagonale des Parallelogramms ist dann die erwähnte Ersatzkraft \underline{R} . Alternativ zur **Parallelogrammkonstruktion** ist die Vektoraddition der Kräfte \underline{F}_1 und \underline{F}_2 zu sehen. Diese ist rechts in Abbildung 1.2.1 dargestellt. Wie zuvor erwähnt, gilt die Grundregel, Vektoren bei der Addition aneinanderzuketten, indem man den Fuß des einen Vektors an den Kopf des anderen hängt. Dabei ist es gleichgültig, welche Reihenfolge man wählt. Auch das ist aus Abbildung 1.2.1 ersichtlich.

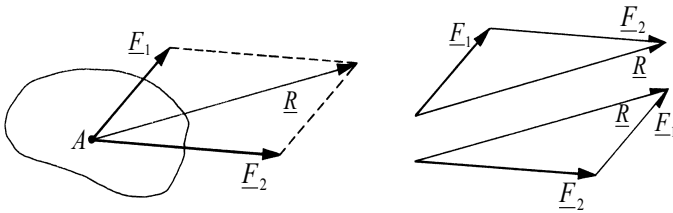


Abb. 1.2.1: Zum Begriff der resultierenden Kraft.

Wir verallgemeinern unser Ergebnis auf die Vektorsumme von n Stück Kraftvektoren, die alle in einem gemeinsamen Punkt angreifen: Abbildung 1.2.2. Ihre Resultierende erhält man durch Vektoraddition gemäß der Gleichung:

$$\underline{R} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \dots + \underline{F}_n = \sum_{i=1}^n \underline{F}_i \quad (1.2.1)$$

Wieder gilt die Grundregel, dass die Addition dadurch vorzunehmen ist, dass man die Vektoren \underline{F}_i in beliebiger Reihenfolge, Pfeilende auf Pfeilspitze folgend, aneinanderkettet.

Nun langt es im Allgemeinen nicht, diese Regel zu kennen, ohne sie zahlenmäßig auszuwerten. Man will eben exakt wissen, wie lang die Resultierende ist und in welchem Winkel sie am Punkt A angreift. Um dieses herauszubekommen, können verschiedene Verfahren angewendet werden, die **rechnerischer** oder **zeichnerischer** Natur sind.

a) Zeichnerische Lösung

Wir wollen diese Verfahren anhand von zwei Beispielen näher kennenlernen. Betrachte dazu zunächst Abbildung 1.2.3:

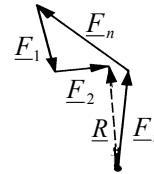
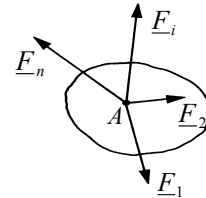


Abb. 1.2.2: Zur Kräfte-Summe.

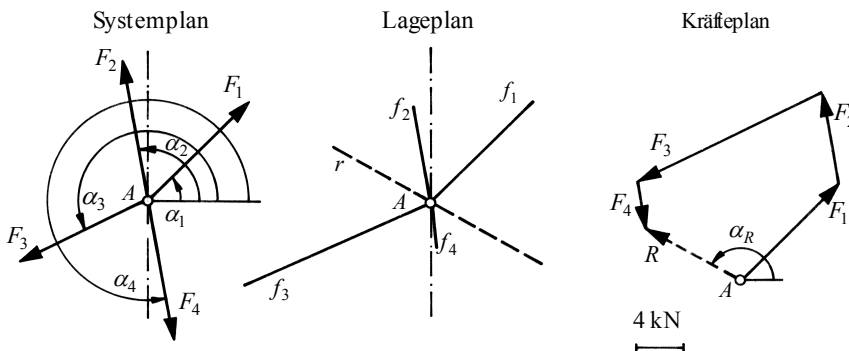


Abb. 1.2.3: Zum Begriff des Kräfte- und Lageplans.

An einem Punkt A eines Körpers (etwa der Spitze einer Fahnenstange) wirken vier Kräfte $F_1 = 12 \text{ kN}$, $F_2 = 8 \text{ kN}$,

Stichwort- und Namensregister

1-Kraft Konzept 462
3-Punkt-Biegeprobe 66, 287

A

Abklingkoeffizient 290
Abkühlung 114
Abrollbedingung 489, 498
Abscheren 106, 119
Abstimmung 296
actio = reactio 5, 230, 326
Aktion 480
Amplitude 277
Analogie Translation-Rotation 262f
Anfangsbedingung 196, 279, 291, 357
Anfangsstörung 357f, 366
Angelpunkt 27
Anisotropie 334
Anregungsfrequenz 295
aperiodischer Grenzfall 292
APOLLONIUS 23
Arbeit
– komplementäre Beschleunigungs- 455
– virtuelle 434ff
– virtuelle Ergänzungs- 454
– virtuelle Komplementär- 454
Arbeitsinkrement 386
Arbeitssatz 235
– der Mechanik 222
– für Massenpunktsysteme 235
– der Rotation 258
– für starre Körper, 2D 272
ARCHIMEDES 22, 378ff
– Hebelgesetz 22, 437f
ARISTOTELES 209
ATWOOD, George 270
ATWOODSche Fallmaschine 268, 488, 498
Auftrieb Flugzeug 377f
Auftrieb nach ARCHIMEDES 378ff
AUGUSTINUS 449
Auslenkung 185

B

Balken 60ff
– gerade 62ff
– stetig gekrümmt 81
Ballistik 211, 440
Beanspruchung 105
– zusammengesetzt 161ff
BEECKMAN, Isaac 19
Belastung 68 *siehe* Beanspruchung
Beobachter 203, 216
– gefesselt 248
BERNOULLI, Daniel 376ff
BERNOULLI, Jacob 376
BERNOULLI, Johann 12, 362
BERNOULLI, Separationsverfahren 362ff
BERNOULLISCHE Gleichung 376ff
Berührungsebene 237
Beschleunigung 194
– 1D 194
– 3D 202
– Bahn- 207
– in Polarkoordinaten 205
– Momentan- 194
– Normal- 207
– Tangential- 207
– Zentripetal- 207
BETTI, Enrico 413
BETTI, Satz von 411ff
Beulen 186
Bewegung 193, 313
– 1D 193
– 3D 202
– behinderte 197
– Feder 198
– geführte 211
– gleichförmig, 195
– im kontinuumsmechanischen Sinn 313
– Kreis- 207
– LAGRANGESche Beschreibung 332
– mit COULOMBScher Gleitreibung 215
– mit STOKESScher Reibung 217
– potenzielle 85
– Relativ- 99

- Rotations-34
- Translations- 34
- Bewegungsgleichung 274
- der Rotation 257
- Euler-Langrangesche 481
- HAMILTONSche 504
- LANGRANGESche 1. Art 498
- Bezugssystem 209
- Biegeachse 145
- Biegedrillknicken 186
- Biegelinie 137ff
- Differentialgleichung 137ff
- Biegemoment 62
- Biegespannungsformel 152
- Biegung
 - gerade Biegung 149
 - reine Biegung 120
 - schiefe Biegung 145, 150
 - Querkraftbiegung 128
- Bilanz
 - der inneren Energie 386
 - Drehimpuls-, global 338
 - Drehimpuls-, lokal 336
 - Energie- 235, 381ff
 - Entropie- 389ff
 - Impuls- 218, 326ff
 - Massen-, global 311
 - Massen-, lokal 318
 - Massen-, Strömung 372
 - Produktionsterm 382
 - Zufuhrterm 382
- Bilanzgleichung *siehe* Bilanz
- Bindung, geometrisch 227
- Bogenlänge 206
- BRAHE, Tycho DE 3, 215
- BREDT, Rudolf 154
- BREDTSche Formel, 1. 155
- BREDTSche Formel, 2. 159
- Bruchspannung 112

C

- CARTESIUS *siehe* DESCARTES
- CASTIGLIANO, 1. Satz 419
- CASTIGLIANO, 1. erweiterter Satz 403
- CASTIGLIANO, 2. Satz 419
- CASTIGLIANO, 2. erweiterter Satz 403
- CASTIGLIANO 400
 - für diskrete Belastungen 418
 - für statisch bestimmte Systeme 420
- CASTIGLIANO, Carlo A. 400

- CAUCHY, Augustin Louis 323
- CAUCHYSches Tetraederargument 325
- CAUCHYSche Gleichung 324, 350
- Charakteristikenverfahren *siehe*
- D'ALEMBERT
 - charakteristische Gleichung 291, 306
- CLEBSCH 116
- CORIOLIS 113
- COULOMB, Charles A. DE 85
- COULOMBBreibung 288
- COULOMBSches Reibungsgesetz 86, 90
- CRAMER, Gabriel 308
- CRAMERSche Regel 309

D

- D'ALEMBERT, Charakteristikenverfahren 356, 359
- D'ALEMBERT, Jean Le Rond 213, 356
- D'ALEMBERTSches
 - Prinzip 499
 - Prinzip in LANGRANGEScher Fassung 476ff
- Dämpfer, linear 289
- Dämpferkonstante 290
- Dämpfung
 - schwach 293
 - stark 291
- Dämpfungsgrad 291
- Dashpot 303
- Deformation
 - elastisch 220, 238
 - irreversibel 238
 - plastisch 220f, 238
- Deformationstheorie, linear 334
- Dehnung 113f
- Dehnungsmaß, linear 340
- Dehnungspotential 404
- Dehnungsspannungsfunktion 403
- Dekompression 220
- Dekrement, logarithmisch 294
- DESCARTES, René 19
- Determinante 30, 192, 336
- Determinantenbedingung 30
- Deviationsmoment 146ff, 471
- Diagonalisierungsmethode 306
- Dichte 41, 322
- Differenzial, total 225
- Differenzialgleichung
 - DGL 2. Ordnung 187
 - DGL 2. Ordnung, Ansatz 290
 - DGL 2. Ordnung, linear, homogen 279
 - DGL 4. Ordnung 191

- partielle DGL 157
 - Dissipation 239
 - Doppel-T-Profil 150, 178ff
 - Drall 226, 472
 - Drallsatz 226, 254, 294, 476
 - starrer Körper 253
 - Drehachse 244ff
 - momentan 244
 - Drehfederkonstante 160
 - Drehimpuls 226, 472
 - spezifisch 336
 - Drehimpulsbilanz der Kontinuumsmechanik 336 *siehe* Bilanz
 - Drehimpulssatz
 - Massenpunktsystem 231
 - starrer Körper 253
 - Drehmoment 94, 96, 98, 158, 431
 - Drehpunkt 23ff, 247
 - Drehwinkel, spezifisch 160
 - Dreibein 2, 33ff
 - Dreieckslast 39
 - Druck, hydrostatisch 375
 - Druckformel, hydrostatische 375
 - DUHAMEL, Jean M. C. 113
 - DUHAMEL-NEUMANN-Beziehung 114
 - Durchbiegung 137ff *siehe* Biegung
 - Dynamik 193ff
 - Massenpunkt 208
 - Massenpunktsystem 226
 - Punktmasse 193ff
 - starrer Körper 242ff
- E**
- Ebene, schief 88, 215
 - Eigenfrequenz 281, 287, 305f, 363
 - Eigenwertgleichung 191
 - Einflusszahl 414
 - Einschwingdauer 300
 - Einspannung 141
 - fest 70, 140
 - EINSTEIN, Albert 166, 449
 - EINSTEINSche Summenkonvention 316
 - Einzellastverfahren 74
 - Elastizität 221
 - Elastizitätsmodul 112
 - für Gummi 398
 - Elastodynamik 339ff
 - Elastostatik 103, 410
 - Energie
 - chemische 240
 - Formänderungs- 400ff *siehe* Formänderungsenergie
 - freie 402
 - innere 221, 383
 - innere, Bilanz 386ff
 - kinetische 221ff, 381f
 - potenzielle 223, 484
 - Verformungs- 414 *siehe* Formänderungsenergie
 - Energiebilanz 381ff
 - Energiedichte, freie 402
 - Energieerhaltungssatz 383f
 - Energiefunktional 421ff, 481
 - Energieinduzierte Elastizität 398
 - Energieprinzip 466ff
 - Energiesatz 235ff
 - der Mechanik 221ff
 - Massenpunktsystem 235
 - Rotation 258
 - Schwinger 280
 - starrer Körper 272f
 - Energiewert, mittlerer 283
 - Enthalpie 389
 - freie 400
 - Entropie 389ff
 - spezifische 390
 - Entropieinduzierte Elastizität 393
 - Entropieproduktion 390, 421
 - Entwicklungssatz 470
 - Erdschwere 42
 - Ergänzungsenergiedichte 403
 - Erhaltungsgröße 338, 382, 506
 - Erhaltungssatz 382
 - nach HAMILTON 506
 - Erregerfrequenz 295, 310
 - Erregung
 - kraftgesteuert 298
 - unwuchtgesteuert 299
 - weggesteuert 298
 - Erregungspart 300
 - Erwärmung 114
 - EUKLIDische Geometrie 166
 - EULER, Leonard 12, 111, 377
 - EULER-EYTELWEINSche Gleichung 99
 - EULERhyperbel 189
 - EULERSche Darstellung 312, 317, 320f, 332, 343
 - EULERSche Kinematikgleichungen 248
 - EULERSche Knickgleichung 186ff
 - EULERSche Knicktypen 189
 - EULERScher Knickstab 187

EULERSche Variationsgleichung 425ff
 Expansion 312
 Extremalprinzip 423
 Extremalrechnung 175
 Extremumsbedingung 74
 Exzentrizität 163, 186
 EYTELWEIN, Johann A. 97

F

Fachwerk 55ff
 Fadenpendel 280
 FARADAY 411
 Faser, strichliert 78ff
 Feder 198
 – Parallelschaltung 285
 – Reihenschaltung 286
 – Serienschaltung 285
 Federgesetz 185
 Federkonstante 279, 284
 – Torsion 286
 Federschwinger 280
 Federsteifigkeit 285 *siehe* Feder
 Feld 318, 322, 342
 – Geschwindigkeits- 318
 – Massen- 318
 – vektorwertig 327
 Feldgröße 318, 328
 FERMAT 118
 Fesselung 52
 Festigkeit 103ff
 Festigkeitshypothese 177
 Festigkeitsnachweis 161, 177
 Festkörper, linear elastisch 328
 First Law 209 *siehe* Lex Prima
 Flächenmoment 1. Ordnung 45, 132
 Flächenschwerpunkt
 – Dreieck 47
 – Halbkreis 49
 – Parabel 48
 Flächenträgheitsmoment 122ff
 – axial 145
 – polar 147
 – polar, starrer Körper 256
 FLAMSTEED 10
 Flansch 134f
 Fließgrenze 113
 Fluid
 – inkompressibel 322
 – Navier-Stokes- 331
 – NEWTONSches 331

– reibungsfrei 328
 Flüssigkeit 290, 375
 FÖPPL, August 160, 173
 Formänderungsenergie 400ff, 418
 – duale Darstellung 446
 – komplementär 456
 – Kräfte 408
 – linear-elastischer Körper 407ff
 – Momente 409
 FOURIER, Jean Baptiste Joseph Baron de 114, 333, 356, 386, 466
 FOURIERkoeffizienten 366
 FOURIERreihe 366
 FOURIERScher Integralsatz 370
 FOURIERSches Gesetz 388
 FOURIERtransformierte, 370
 Freier Fall 196
 Freiheitsgrad 52ff, 242f, 480
 – Rotation 52, 243f
 – Schwinger 278
 – starrer Körper 242ff
 – Translation 52, 242
 Freikörperbild 4
 Freischnitt 4ff *siehe* Schnitt
 Freie Energie (-dichte) 402
 Freie Enthalpie (-dichte) 404
 Frequenz 276
 Frequenzgang 296, 301f, 310
 Frequenzverhältnis 296
 FRESNEL 114
 Fuge 85, 110, 131
 Funktional 424ff, 430

G

GALERKIN, Boris G. 450
 GALERKIN, Näherungsmethode 452
 GALILEI, Galileo 20, 208, 440
 GALILEISches Inertialsystem 209
 Gas, ideales 330
 Gaskonstante 330
 GAUß, Johann Carl-Friedrich 118, 320
 GAUßscher Satz 318
 GERBER, Heinrich 441
 GERBERträger 441
 Geschwindigkeit
 – 1D 193
 – 3D 202
 – generalisiert 482
 – in Polarkoordinaten 205
 – mittlere 193f

– momentan 194
 – Winkel- 233
 Geschwindigkeitsfeld 318
 Geschwindigkeitsgradient 331
 Gestaltänderungsarbeit nach von MISES-
 HUBER-HENCKY 177
 GIBBS, Josiah Willard 392
 GIBBSsche Gleichung 391ff
 Gitterabstände 393
 Gleichgewicht 12ff, 423
 – indifferent 184, 423
 – instabil 84
 – labil 184, 423
 – stabil 184, 423
 – statisch 90
 Gleichgewichtsbedingungen 12ff, 34ff
 – 2D 26ff
 Gleichgewichtslage 184
 Gleitreibungsbeiwert 86
 Gleitwiderstand 86
 Gleitwinkel 120
 GORDON, J. E. 111
 Gradient
 – Temperatur- 388
 – Geschwindigkeits- 331
 – Verformungs- 334
 – Verschiebungs- 332ff
 Gravitation 6
 Grenzfall, aperiodisch 292, 303
 Gummielastizität 393

H

Haftreibungskoeffizient 86, 267, 269
 HAMILTON, Sir William R. 479
 HAMILTONsche Bewegungsgleichung 504ff
 HAMILTONscher Formalismus 506
 HAMILTONsches Prinzip 480, 492
 Hauptachsenträgheitsmoment 147
 Hauptachsenzentralsystem 472
 Hauptträgheitsachse 121, 145ff
 Hauptträgheitsmoment 471
 Hebelarm 23
 Hebelgesetz 22, 438
 HELMHOLTZ 114, 171
 HENCKY, Heinrich 179
 HERTZ, Heinrich 171, 276
 HERTZsche Pressung 170
 HERTZscher Spannungszustand 170
 Hilfslinie, strichliert 65ff
 HIRST, Thomas A. 126
 Hohlprofil 154ff

Hohlwand 154
 HOOKE, Robert 122
 HOOKESche Feder 279
 HOOKEScher Bereich 112, 121
 HOOKESches Gesetz 113, 334f, 342, 443
 HUBER, Maxymilian T. 175
 Hüllfläche 316
 Hydromechanik 372ff

I

Impuls 208
 – generalisiert 504
 Impulserhaltung 218
 Impulserhaltungssatz 231
 Impulsleistung, virtuell 468
 Impulsmoment 226
 Impulssatz 218, 230
 – Massenpunktsystem 230
 – starrer Körper 272
 Indexkalkül 470
 Inertialsystem 209
 inkompressibles Material 322
 Innenkreis, Konzept 156
 Integral, elliptisch 235, 496
 Integrationskonstanten 70ff
 Invarianzeigenschaft 147
 Isothermie 391
 Isotropie 104

J

Jo-Jo 269

K

Keil 101
 Keilriemen 101
 Keilwinkel 102
 KEPLER 3
 Kernbereich 163
 Kernfläche 164
 Kettenregel 139, 198
 Kinematik 193ff, 242ff
 – Massenpunkt 193
 – Massenpunktsystem 226
 – starrer Körper 242
 kinematische Bestimmtheit 57
 Kinetik 208ff, 253ff
 – Massenpunkt 208
 – Massenpunktsystem 228
 – Starrkörper- 253
 Kippen 186

- KIRCHHOFF 116, 171
 Kleber 136
 Knickbedingung 188
 Knicken 186
 Knicklänge 189
 Knickpunkt 80
 Knicktypen 189
 Knotenpunkt 16
 Knotenpunktverfahren 57
 Koeffizientenvergleich 10
 Kommutativgesetz 3
 Kompatibilität 445
 Komplementärarbeit 456
 komplexwertig 370
 Kompression 220, 312
 Kompressionsperiode 219
 Kontaktwinkel 97
 Kontinuitätsgleichung 319, 375
 Kontinuum 347, 383
 Kontinuumsmechanik 311ff
 Kontrollfläche 374
 Kontrollvolumen 373ff
 Konvention
 – Vorzeichen Biegelinie 140
 – Energie 384
 – Geschwindigkeit 194
 – Koordinatensystem 37
 – Masse 239
 – Moment 23
 – Momentenfläche 65, 78
 – Summen- *siehe* EINSTEIN
 – Schnittufer 62
 – Vorzeichen Normalspannung 106
 – Torsionsmoment 160
 Koordinaten
 – generalisiert 478, 480ff
 – Eigen- 206
 – mitgeführt 206
 – natürlich 214
 – Polar- 147, 204
 – kartesische 14, 202
 – unabhängig 480
 – Zylinder- 206
 Koordinatensystem 2, 14, 169, 204
 Koppeltabelle 464
 Körper
 – homogen 43
 – inhomogen 41
 Kosinussatz 8
 Kraft 1
 – 3D 18
 – Amplitude 73
 – Angriffspunkt 2, 12, 23
 – Auftriebs- 378
 – äußere 5, 228
 – Bedingung 28
 – Betrag 1
 – Bindungs- 304
 – dissipativ 225
 – eingepägt 4
 – Einzel- 3
 – Flieh- 209
 – Formänderungsenergie 401
 – Freischnitt 5
 – Führungs- 211
 – generalisiert 482, 494
 – Gewichts- 41
 – Gleichgewicht 13ff
 – Gleitwiderstands- 85
 – Haftreibungs- 85
 – Halte- 15, 85
 – innere 5, 228
 – Kinetik 208, 228, 253
 – Komponenten 10
 – konservativ 224
 – kontinuierliche Verteilung 39
 – langreichweitig 324
 – Linien- 3, 40
 – Mittelpunkt 38
 – nicht konservativ 224
 – Normal- 14, 62
 – Oberflächen- 4, 324,
 – Oberflächen-, Leistung 382
 – parallel 21
 – Pfeil 12
 – Quer- 62
 – Reaktions- 4, 16
 – Richtung 1
 – Schein- 213
 – Scher- 119
 – Schnitt- 6
 – Schub- 241
 – Schwerpunkt 37ff
 – Seil- 20
 – Stab- 17
 – System 18ff
 – totale 166
 – Vektor 2
 – verallgemeinert 413
 – virtuell 454ff

– Volumen- 324
 – Volumen-, Leistung 382
 – Wechselwirkungs- 237
 – Widerstands- 85
 – Wirkungslinie 2, 22
 – zentrale Gruppe 15ff
 – zentrale Gruppe 2D/3D 18ff
 – zentrales System 12ff
 – Zentrifugal- 213
 – Zwangs- 4, 211
 Kraft-Dehnungs-Ansatz 304
 Kraftdichte 171
 – Vektor 167
 Kräfteeck 13
 Kräftegruppe 34ff
 Kräftepaar 24ff
 Kräfteplan 7
 Kräftepolygon 15
 Kräftesatz, starrer Körper 264
 Kraftstoß 218ff
 Kragträger 67
 Kreisbahn 245
 Kreisfrequenz 277
 Kreuzprodukt 30ff
 Kriechbewegung 292
 KRONECKER, Leopold 331
 KRONECKERSymbol 330
 Krümmung 65

L

Lageplan 7
 Lager 52ff
 – dreiwertig 53, 54
 – einwertig 52
 – Gleit- 52
 – Rollen- 52
 – zweiwertig 52f
 LAGRANGE, Joseph L. 466
 LAGRANGEfunktion 480ff
 LAGRANGESche Beschreibung 313
 LAGRANGESche Darstellung 312, 321, 333
 LAGRANGESche Gleichung 1. Art 492
 LAGRANGEScher Multiplikator 493
 LAGRANGIA, Guiseppe L. *siehe* LAGRANGE
 LAMÉ, Gabriel 118
 LAMÉsche Konstante 120
 LAMÉ-NAVIERSche Gleichungen 341
 LAPLACE, Pierre Simon de 354
 LAPLACEoperator 354
 LAPLACESche partielle DGL 157

Last, verteilt 73f *siehe* Beanspruchung
 LEGENDRE, Adrien Marie, 402
 LEGENDRE-Transformation 402, 504
 LEHR, Ernst 291
 LEHRsches Dämpfungsmaß 291
 LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm von 9, 314
 LEIBNIZsche Regel 314
 Leistung 224, 385
 – Oberflächenkraft 385
 – Volumenkraft 385
 Leistungsinkrement 386
 Lex Prima 209
 Lex Secunda 208
 Lex Tertia 209
 Linearer Verzerrungstensor 333
 Linienintegral 155
 Linienkraft 3, 39ff
 Lokale Zeitableitung 321
 LUDOLFSche Zahl 22
 Luftdruck 375

M

Masse, zeitveränderlich 239
 Massenbilanz 311ff
 – lokal, für reguläre Punkte 318
 Massendichte 311ff
 Massendichtefeld 318
 Massenfluss 311, 374
 Massenmittelpunkt 42
 Massenpunkt 208
 Massenschwerpunkt 41
 Massenstrom 318
 Massenträgheitsmoment 234, 471
 – axial 471
 – starrer Körper 254
 Material
 – homogen 104
 – inkompressibel 322
 – isotrop 104
 Materialgleichung 328
 Materialklasse 328
 Materialtheorie 328
 Materie 311
 Materielle Darstellung 313, 333
 Materielle Zeitableitung 321
 Matrix 304, 419
 – Einheits- 330
 Matrixschema Spannungstensor 165
 MAXWELL, James C. 411
 MAXWELL, Satz von 411ff

MISES, Richard VON 174
 Modell 208
 – Festkörper 304
 – Massenpunkt 227
 – starrer Körper 242f
 MOHR, Otto 173
 MOHRsche Gleichung 176
 MOHRscher Kreis 148, 171ff, 471
 Molekulargewicht 330
 Moment 20
 – Bedingung 27
 – Deviations- 146ff, 471
 – Formänderungsenergie 408
 – Gleichgewicht 22
 – reines 25
 – statisches, 1. Ordnung 45, 448
 – Torsions- 162
 Momentanpol 252
 Momentanzentrum 252
 Momentendichte 337
 Momentenfläche 64, 72ff
 Momentensatz 226
 – starrer Körper 254
 Momentenstoß 272
 MOSOTTI 413

N
 Nachdifferentiation 305
 NAPOLEON 115
 NAVIER, Claude Louis Marie Henri 333
 Nebenbedingung 498ff
 – holonom 501
 – kinematisch 227, 261
 – rheonom 500
 – skleronom 501
 Neigungswinkel, kritisch 84
 NEUMANN, Franz E. 114
 neutrale Faser 122
 NEWTON, Sir Isaac 8, 208
 NEWTONS Grundgesetz 208 *siehe* Lex
 Secunda
 NEWTONSche Mechanik 213
 Normalkraftfläche 62
 Nullniveau 487
 Nullstab 58

O
 Oberfläche 316
 Offset 173

P
 Parallelepipet 470
 Parallelogrammkonstruktion 6
 Parameterdarstellung 210
 Parameterintegral 314
 PdvK 454ff
 – statisch bestimmt 459
 – statisch unbestimmt 460
 PdvV 429ff
 – Elastostatik 443
 – Näherungsmethoden 450
 – Prinzip von TORRICELLI 441
 – Statik elastischer Systeme 442
 – Statik starrer Systeme 436
 Pendel, physikalisches 281
 Pendelstab 52
 – verkettet 16
 Pendelstütze 35
 Periode 303
 Periodendauer 276
 Periodizitätseigenschaft 147
 PFAFF, Johann Friedrich 501
 PFAFFSche Formen 501
 Pfeilspitze 16
 Phasenfrequenzgang 301
 Phasengeschwindigkeit 352
 Phasenverschiebung 301
 Plastizitätsgrenze 112
 PLUTARCH 24
 POISSON, Simon D. 115, 117, 126, 360
 POISSONSche Zahl 115
 Polarkoordinaten 147
 Polynomansatz 452
 Position
 – 1D 193
 – 3D 202
 Potenzial 224, 236, 273, 479
 Potenzialansatz nach LENNARD-JONES 304
 Potenzialfunktion 225
 PRANDTL, Ludwig 160
 PRANDTL Strömungsanalogie 158
 Prinzip der kleinsten Wirkung 480
 Prinzip der virtuellen Kräfte *siehe* PdvK
 Prinzip der virtuellen Verschiebung *siehe*
 PdvV
 TORRICELLI, Evangelista 440
 Prinzip von TORRICELLI 441
 Prinzip der virtuellen Verrückungen *siehe*
 PdvV
 Prinzip
 – Extremal- 421ff

– HAMILTON- 478
 Produktansatz 362
 Produktionsterm 382
 Profil
 – Doppel-T- 157f
 – geschlossen 154
 – L- 157
 – offen 154f
 – T- 157
 PRONY, Gaspard C. F. M. R. Baron DE 90
 PRONYScher Zaum 90
 Proportionalitätsgrenze 112
 Punktmasse 208
 PYTHAGORAS VON SAMOS 2
 PYTHAGORAS, Satz des 3

Q

Q-S-I-nen Formel 132
 Querdehnung 114
 Querdehnungszahl 115
 Querkontraktion 115
 Querkontraktionszahl 103, 115, 334
 Querkraftbiegung 105, 128
 Querkraftfläche 62ff

R

Randbedingung 70, 187, 341, 360, 363, 450
 – geometrisch 445
 – physikalisch 445
 Rastpolbahn 253
 Rauigkeit 85
 Rechte-Hand-Regel 33
 Reflexion, elastisch 220
 Reibung 84ff
 – am Keil 101
 – geschwindigkeitsproportional 289
 – Gleit- 85
 – Haft- 85
 – Umschlingungs- 97
 Reibungsbremse 90ff
 Reibungsfuge 84
 Reibungskegel 87
 Reibungswiderstand 85, 95, 290
 Reibungswinkel 87
 Resonanz 297, 310
 Restitutionsperiode 219
 Resultierende 6ff
 Reversibilität 391
 REYNOLDS, Osborne 318

REYNOLDSSches Transporttheorem 314ff, 381, 386
 REYNOLDSzahl 318
 Reziprozitätssatz
 – von BETTI 413
 – von MAXWELL 414
 Richtung 1ff
 RITTER, August 60
 RITTERscher Schnitt 59ff
 RITZ, Näherungsmethode 449f
 RITZ, Walter 449
 Rollbedingung 268
 Rollen, rein 266ff, 476
 Rotation 244ff, 468ff *siehe* Drehachse
 – um feste Achse 244
 Ruhelage 276

S

SAINT-VENANT, Adhémar J. C. B. DE 147
 Satz von STEINER 125ff, 256
 Schallgeschwindigkeit 347
 Scherband 176
 Schermodul 120
 Scherviskosität 331
 Scherwinkel 158
 schiefe Ebene 88, 215
 Schlankheitsgrad 188
 Schlupf 252, 267f
 Schmiegekreis 82, 138, 206
 Schnelle 357f, 371
 Schnitt *siehe* Freischnitt
 – Größen 62, 72ff
 – Prinzip 5, 62ff
 – Ufer 62
 Schraube 92
 Schub 130, 241
 Schublast 119
 Schubmittelpunkt 136ff
 Schubmodul 158, 335
 Schubsteife Träger 462
 Schubzustand, rein 176
 Schwache Form der Impulsbilanz 436
 Schwerachse 45
 Schwerkraft 1, 212, 217, 257, 376
 Schwerpunkt 37ff, 122, 193, 440
 – Linien- 50
 – Massen- 41
 – Volumen- 43ff
 – Flächen- 44ff
 Schwerpunktsatz 230, 264

- Massenpunktsystem 230f
- starrer Körper 264
- Schwinger *siehe* Schwingung
- endlich viele Freiheitsgrade 302ff
- Schwingung 276ff, 497, 503
 - 1 Freiheitsgrad 288
 - 2 Freiheitsgrade 303ff
 - N Freiheitsgrade 278, 305
 - angefacht 278, 302ff
 - COULOMBreibung 288
 - erzwungen 278 *siehe* Erregung
 - frei 278
 - gedämpft 278
 - Grund- 364
 - harmonisch 277
 - linear 278
 - longitudinal 347
 - Membran 352ff
 - mit Dämpfung 288ff
 - nicht linear 278
 - Ober- 364
- Schwingungsdauer 276f
- Schwingungsgleichung 287, 348ff
 - Saite 348ff
 - Stab 346ff
- Schwingungsisolierung 310
- Schwingungstilgung 310
- Second Law *siehe* Lex Secunda
- Seilbremse 98
- Selbstsperrung 96, 100
- Semiinverse Methode 344
- Separationsverfahren 362
- Sicherheit 101
- Sicherheitsbeiwert 113
- Sinussatz 9
- SOMMERFELD, Arnold 60
- Spannung 105
 - Axial- 169, 360, 394
 - Biege- 107, 120ff, 130, 150f, 162
 - Bruch- 113
 - Druck- 106ff, 121, 163, 330, 408
 - Fließ- 112, 189
 - Kerb- 108
 - kritische 188
 - kritische Grenz- 188
 - Normal- 106ff, 128, 161ff
 - Radial- 169
 - resultierende 161ff
 - Scher- 165ff
 - Schub- 106f, 119, 151ff, 164ff, 179ff
 - Thermo- 114
 - Umfangs- 159, 169
 - Vergleichs- 162, 177ff
 - Wärme- 118f
 - Zug- 106ff, 176
 - zulässige 113f
- Spannungs-Dehnungs-Kurve 112, 401
- Spannungsfluss 108, 155ff
- Spannungsdehnungsfunktion 401
- Spannungsnachweis 171, 177
- Spannungsnulllinie 150
- Spannungstensor 148, 324
 - 2D 166
 - 3D 170f
 - Symmetrie 169
 - variiert 454ff
- Spannungszustand 175ff, 339, 408
 - eben 165ff
- Spatprodukt 470
- Spur 335
- Stabilitätsproblem 184ff, 390, 431
- Starrkörperdynamik 242ff
- Statik 1ff, 208, 213, 341 410ff
- statisch bestimmt 13, 27, 115ff, 415ff *siehe* System
- System
 - statisch unbestimmt 13, 27, 116ff, 143, 415ff, 460 *siehe* System
- statisches Moment
 - Dreieck 47
 - Halbkreis 49
 - Parabel 48
- Steg 135f
- Steifigkeit 103, 111
- Steifigkeitstensor 334
- Steigungswinkel 210
- STEINER, Jacob 126
- STEINER-Anteil *siehe* Satz von STEINER
- STEVIN, Simon 17
- STOKES, George G. 217
- STOKESSche Gleichung 217
- Stored energy density 401
- Störung 359
- Stoß 218f
 - gerade, zentrisch 236
 - plastisch 238
- Stoßdämpfer 290
- Stoßzahl 221
- Strahlung 384
- Strahlungsdichte, spezifisch 384
- Strain energy density 401
- Streckenlast 4, 40

- Strömung 331, 388
 – laminar 318
 – stationär 374, 388
 – turbulent 318
 Strömungsanalogie nach PRANDTL 158
 Stromlinie 376
 Stromfaden 376
 Substitutionsverfahren 305
 Summationsindex 319 *siehe* EINSTEIN
 Summenkonvention 168, 316, 337 *siehe* EINSTEIN
 Superpositionsprinzip 144, 411
 Symmetrie 46, 124
 Symmetrieachse 46, 149, 472
 Symmetrieebene 472
 System
 – abgeschlossen 311
 – Bezugs- 209
 – elastisch 103
 – linear elastisch 116f
 – nicht konservativ 479
 – statisch bestimmt 13, 27, 115ff, 415ff
 – statisch unbestimmt 13, 27, 116ff, 143, 415ff, 460
 Systemfreiheitsgrad *siehe* Freiheitsgrad
 Systemgrenze 311f, 373
- T**
- Tabellenkalkulation 128
 Tabellenmethode 51, 464
 Tabellenrechnung 127f
 Tabellenverfahren 127f
 TAYLOR, Brook 235
 TAYLORreihe 82, 236, 348, 355
 Temperatur 304, 330
 – absolut 330
 Temperaturänderung 118
 Temperaturgradient 388
 Tensor
 – antimetrisch 337
 – Flächenträgheits- 148
 – Massenträgheits- 471
 – Spannungs- 165ff, 178
 – Spannungs-, 2D 165ff
 – Spannungs-, 3D 170ff
 – Spannungs-, Symmetrie 169, 324
 – Spannungs-, variierter 455
 – Trägheits- 471f
 – Verzerrungs- 333
 Tetraederargument 325ff
 Theorie 1. Ordnung 103, 184
 Theorie 2. Ordnung 103
 Thermischer Ausdehnungskoeffizient 114
 Thermodynamik
 – 1. Hauptsatz 223, 387
 – 2. Hauptsatz 389ff
 Third Law *siehe* Lex Tertia
 TIMOSHENKO, S. P. 173
 TORBERG 215
 TORRICELLI, Evangelista 440
 Torsion 151ff
 Torsionsmoment 136f, 160
 Torsionsstab 158
 Torsionssteifigkeit 137
 Totales Differential 225
 Träger,
 – Biege- 130
 – biegesteif 60ff
 – geklebt 134
 – gekrümmt 81ff
 – genietet 134
 – geschweißt 134
 Trägheitsellipse 149
 Trägheitsmoment 122f
 – Kreis 125
 – polares 152
 – polares, dünner Ring 153
 – polares, Kreis 152
 – polares, Vollprofil 152
 – Rechteck 124
 – zusammengesetzt 126
 Trägheitsradius 149, 188, 255ff
 Trägheitstensor 471f, 492
 Tragwerk 54ff
 – statische Bestimmtheit 56
 Traktion 167
 Translation 227, 468
 Transporttheorem *siehe* REYNOLDS
 transzendente Gleichung 192
 TRESCA, Henri 162
- U**
- Übergangsbedingung 70f, 141
 Umschlingungsreibung 97
- V**
- Variablentransformation 469
 Variationsableitung 434
 Variationsrechnung 423ff, 457
 VARIGNON, Pierre 214
 Vektor

- frei 2
- gebunden 1
- Abstands- 468
- Axial- 33
- Basis- 31, 204f
- Beschleunigungs- 203, 247f
- Binormalen- 206
- Dreh- 246
- Drehimpuls- 226
- Einheits- 32, 245, 255
- Erdbeschleunigungs- 324
- Geschwindigkeits- 202, 205
- Komponentendarstellung 9ff
- Kraft- 2, 6
- Kraftdichte- 167, 171, 327
- Kraftindex 168
- Momenten- 30, 226
- Null- 32
- Orts- 29, 32
- Tangentialbeschleunigungs- 247
- verallgemeinerter Verschiebungs- 412
- Verschiebungs- 332, 340, 386, 440
- Wärmefluss- 388
- Winkelgeschwindigkeits- 246
- Zentripetalbeschleunigungs- 207, 247
- Vektoraddition 3, 6f
- Vektorsumme 7
- Verdrehung 105, 158
 - axial 151ff
- Verdrehwinkel 151, 158
- Verdrillung 154
- Verdrillwinkel 159, 447
- Verformung
 - plastisch 112
 - Superpositionsprinzip 144
- Verformungsbedingung 117f
- Verformungsenergie 446
- Verformungsgradient 333f
- Vergleichsspannung 177f
- Vergrößerungsfunktion 296
- Verrückung, virtuell 429ff
- Verschiebung 332, 429
 - virtuell 429ff, 492
- Verschiebungsgradient 332, 340
- Verstärkungsfunktion 302
- Verzerrungstensor 333, 433
- Verzerrungsenergiedichte 418
- Verzögerung 199
- Virtuelle Ergänzungsarbeit 454
- Virtuelle Impulsarbeit 466
- VOIGT 116
- Volumen, materiell 311
- Volumenintegral 42
- Volumenschwerpunkt 43f
- Volumenviskosität 331
- Vorzugsrichtung 175
- W**
- Wärme 221, 223
- Wärmeausdehnung, behinderte 118
- Wärmefluss 384
- Wärmeinhalt 389
- Wärmeleitungsgleichung 331
- Wechselwirkungsgesetz 5
- Wechselwirkungsprinzip 3
- Wegunabhängigkeit 225
- WEISS E.C. 116
- Welle 347ff
- Wellengleichung, Lösung 355ff
- Werkstoff 103f
 - inkompressibel 115
- Widerstand
 - Luft- 211
 - Reibungs- 85, 97
- Widerstandsmoment 123ff
 - Kreis 125
 - Rechteck 124
 - polares 153
 - polares, dünner Ring 153
 - polares, Kreis 153
 - Torsions- 162
 - zusammengesetzt 125
- Winkel, spezifisch 160
- Winkelgeschwindigkeit 233, 245
- Wippe 438
- Wirkungslinie 21, 22, 23, 28
- Wurf 210
- Y**
- YOUNG, Thomas 111
- YOUNG'scher Modul 112 *siehe*
- Elastizitätsmodul
- Z**
- Zeitableitung
 - lokal 321
 - materiell 321
- Zentrifugalmoment 471
- Zylinderkoordinaten 206, 245