

M. Kochsiek, M. Gläser

Massebestimmung



This Page Intentionally Left Blank

M. Kochsiek, M. Gläser

Massebestimmung



Forschen – Messen – Prüfen

Monographienreihe der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt,
herausgegeben von J. Bortfeldt, W. Hauser und H. Rechenberg

Die Monographienreihe dient der Verbreitung von Themen, die aus der Arbeit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt erwachsen oder eng mit ihr verbunden sind. Dazu gehören nicht nur Fragen der Metrologie, sondern auch die verschiedenen Aspekte der physikalischen und technischen Forschung der Bundesanstalt und von Schwesterinstitutionen, Abschnitte aus der Geschichte von Reichsanstalt und Bundesanstalt finden ebenso Berücksichtigung wie Leben und Leistungen ihrer bedeutenden Persönlichkeiten.

Inhalt und Form der Bände der Reihe – die in deutscher oder englischer Sprache erscheinen – sollen der Vielfalt der Aufgaben und Themen Rechnung tragen. Die Monographienreihe bildet daher die Plattform für ein großes Spektrum von Publikationen, das von lehrbuchartigen Darstellungen bestimmter abgeschlossener Gebiete und Fragestellungen bis zu größeren Berichten über offene Forschungsgebiete, von Biographien und Abhandlungen über historische Themen bis zu Konferenz- und Symposiumsbänden reicht. Die Vielfalt des Inhalts wird sich naturgemäß in einer Vielfalt der stilistischen Behandlung und des Aufbaus, des Umfangs und der Bebilderung widerspiegeln. Es wird allerdings angestrebt, der Reihe ein einheitliches Erscheinungsbild zu geben.

Die Reihenherausgeber

Bisher erschienen:

Bortfeldt, Hauser, Rechenberg (Hrsg.)	Forschen – Messen – Prüfen. 100 Jahre Physikalisch-Technische Reichsanstalt/Bundesanstalt 1887–1987
Cahan	Meister der Messung. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt im Deutschen Kaiserreich
Kern	Forschung und Präzisionsmessung. Die Physikalisch- Technische Reichsanstalt zwischen 1918 und 1948.
Kose, Melchert	Quantenmaße in der elektrischen Meßtechnik
Kramer (Hrsg.)	The Art of Measurement. Metrology in Fundamental and Applied Physics
Rechenberg	Hermann von Helmholtz. Bilder seines Lebens und Wirkens
Röthemeyer (Hrsg.)	Endlagerung radioaktiver Abfälle

Massebestimmung

Herausgegeben von
Manfred Kochsiek
Michael Gläser



Weinheim · New York · Basel · Cambridge · Tokyo

Prof. Dr.-Ing. Manfred Kochsiek
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig

Dr. Michael Gläser
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Lektorat: Roland Wengenmayr
Herstellerische Betreuung: Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Bernd Riedel

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Massebestimmung / hrsg. von Manfred Kochsiek ; Michael Gläser. – Weinheim ; New York ; Basel ; Cambridge ; Tokyo : VCH, 1997
(Forschen – messen – prüfen)
ISBN 3-527-29352-3
NE: Kochsiek, Manfred [Hrsg.]

© VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany), 1997

Gedruckt auf säurefreiem und chlorarm gebleichtem Papier.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers.

Satz: Sven Niedner, D-24159 Kiel-Schilksee
Druck: Strauss Offsetdruck GmbH, D-69509 Mörlenbach
Bindung: Osswald & Co. KG., D-67433 Neustadt/Weinstr.

Vertrieb:
VCH, Postfach 101161, D-69451 Weinheim (Bundesrepublik Deutschland)
Schweiz: VCH, Postfach, CH-4020 Basel (Schweiz)
United Kingdom und Ireland: VCH (UK) Ltd., 8 Wellington Court, Cambridge CBI 1HZ (England)
USA und Canada: VCH, 333 7th Avenue, New York, NY 10001 (USA)
Japan: VCH, Eikow Building, 10-9 Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113 (Japan)

ISBN 3-527-29352-3

Vorwort

Massebestimmungen sind auf den ersten Blick nichts Spektakuläres, für den Bürger etwas Alltägliches. Beim näheren Hinsehen ist – nicht nur für den Wissenschaftler – die Materie (in doppeltem Sinn) wesentlich komplizierter. Was Masse eigentlich ist, ist bis heute noch nicht restlos geklärt; das kommt auch in den verschiedenen Begriffen wie Masse, Gewicht, Wägewert, Last, u.ä. zum Ausdruck. Trotzdem sind hochentwickelte Meßtechniken für die Massebestimmung entstanden, die weit über die reine Wägetechnik hinausführen und den gesamten Bereich der Natur von der Masse des Elektrons bis zu der des Sonnensystems (das sind etwa 60 Dekaden) umfaßt.

Das wissenschaftliche Interesse an der Masse und der Massebestimmung hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Einer der Gründe liegt in der Tatsache, daß die Einheit der Masse eine Basiseinheit des Internationalen Einheitensystems (SI) ist und dazu die letzte, die heute noch durch eine gegenständliche Verkörperung: das Internationale Kilogrammprototyp aus Platin-Iridium, definiert und zugleich realisiert ist. Die anderen SI-Basiseinheiten sind durch Natur- oder Fundamentalkonstanten festgelegt. Auch die Masseneinheit durch eine Natur- oder Fundamentalkonstante darzustellen und das Kilogramm neu zu definieren, ist heute eine Herausforderung für die Wissenschaft. Ebenfalls gewinnt die Massebestimmung selbst durch Forderungen des Qualitätsmanagements, der Produkthaftung und des Verbraucherschutzes immer mehr an Bedeutung.

Über den Massebegriff gibt es inzwischen mehrere Abhandlungen, über wägetechnische Probleme zahlreiche Veröffentlichungen und Bücher. Die Verfasser unternehmen hier den Versuch, einen möglichst umfassenden Überblick über die gegenwärtige Problematik der Massebestimmung zu geben, ohne jedoch den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Das Thema wird dabei in den folgenden Kapiteln von verschiedenen Gesichtspunkten her behandelt, wobei sich das wiederholte Aufgreifen einzelner Probleme nicht immer vermeiden ließ.

Wir danken allen Freunden, Kollegen, Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, die an der Fertigstellung des Manuskripts und der Bilder mitgewirkt haben.

Die Herausgeber

Inhalt

1	Einführung	1
2	Masse als physikalische Größe	5
2.1	Massebegriff	6
2.1.0	Verwendete Formelzeichen	6
2.1.1	Etymologie.....	8
2.1.2	Geschichte des Massebegriffs	9
2.1.3	Masse in der klassischen und relativistischen Physik	15
2.1.4	Das Problem der Masse und der Gravitation in der Teilchenphysik.....	26
	Literatur.....	35
2.2	Einheit der Masse.....	40
2.2.0	Verwendete Formelzeichen.....	40
2.2.1	Historisches.....	41
2.2.2	Das Internationale Einheitensystem (SI).....	47
2.2.3	Stellung der Masse im Internationalen Einheitensystem	53
2.2.4	Definition und Realisierung der Masseneinheit	54
2.2.5	Darstellung und Weitergabe der Masseneinheit.....	65
2.2.6	Aufbau einer Masseskala	68
2.2.7	Literatur.....	70
2.3	Arbeiten zu einer Neudefinition der Masseneinheit.....	72
2.3.0	Verwendete Formelzeichen.....	72
2.3.1	Bedarf und Anforderungen	74
2.3.2	Die Experimente	78
2.3.3	Vorschläge für Neudefinitionen.....	99
2.3.4	Literatur.....	103
3	Bestimmung der Masse	108
3.1	Die Entwicklung der Massebestimmung	109
3.1.1	Die Waage im Altertum	110
3.1.2	Waage und Wägung im Mittelalter	123
3.1.3	Waage und Wägung im Zeitalter der Aufklärung.....	131
3.1.4	Waage und Wägung im 19. und 20. Jahrhundert.....	142
3.1.5	Literatur.....	151

3.2	Massenormale	160
3.2.0	Verwendete Formelzeichen.....	160
3.2.1	Terminologie, Verwendungszweck.....	161
3.2.2	Konventioneller Wägewert, Fehlergrenzen, Dichte des Werkstoffes	162
3.2.3	Bestimmung der Materialdichte.....	165
3.2.4	Anforderungen.....	166
3.2.5	Nennwerte.....	174
3.2.6	Handhabung.....	174
3.2.7	Günstiger Werkstoff und Zusammenfassung.....	177
3.2.8	Literatur.....	178
3.3	Methoden der Massebestimmung	180
3.1.0	Verwendete Formelzeichen.....	180
3.3.1	Physikalische, technische und metrologische Grundlagen.....	184
3.3.2	Direkte Massebestimmung.....	188
3.3.3	Indirekte Massebestimmung.....	222
3.3.4	Literatur.....	226
3.4	Massebestimmung mit Waagen	229
3.4.0	Verwendete Formelzeichen.....	230
3.4.1	Einführung und Übersicht.....	234
3.4.2	Meßprinzipien und Justierung von Waagen.....	235
3.4.3	Substitutionswägung in Luft.....	246
3.4.4	Einfluß- und Störgrößen bei der Massebestimmung.....	254
3.4.5	Volumenbestimmung von Massenormalen.....	261
3.4.6	Unsicherheit der Massebestimmung.....	264
3.4.7	Darstellung einer Masseskala.....	273
	Literatur.....	290
3.5	Vakuumwägung	294
3.5.0	Verwendete Formelzeichen.....	295
3.5.1	Aufgaben und Methoden der Vakuumwägung.....	298
3.5.2	Empfindlichkeit und relative Auflösung.....	299
3.5.3	Vakuum-Makrowaagen.....	303
3.5.4	Vakuum-Mikrowaagen.....	307
3.5.5	Meßtechnik.....	363
3.5.6	Fehler und Einflüsse.....	369
3.5.7	Anwendungen.....	381
3.5.8	Literatur.....	390
3.6	Massebestimmung in der Praxis	400
3.6.0	Verwendete Formelzeichen.....	400
3.6.1	Einleitung.....	402
3.6.2	Grundlagen.....	402
3.6.3	Genauigkeitsanforderungen an Waagen.....	413
3.6.4	Einflußfaktoren.....	415
3.6.5	Waagenarten.....	417
3.6.6	Zusatzeinrichtungen.....	428
3.6.7	Literatur.....	429
3.7	Massebestimmung unter besonderen Bedingungen	431
3.7.0	Verwendete Formelzeichen.....	431

VIII *Inhalt*

3.7.1	Einleitung.....	432
3.7.2	Wägen auf Schiffen.....	432
3.7.3	Wägen bei Schwerelosigkeit.....	434
3.7.4	Erdmasse.....	435
3.7.5	Ausblick: Bestimmung von Massen im Erdverband.....	438
3.7.6	Literatur.....	440

4 Massekomparatoren 442

4.0	Verwendete Formelzeichen	443
4.1	Einleitung.....	444
4.2	Theorie der Balkenwaage	445
4.2.1	Statik	445
4.2.2	Dynamik.....	456
4.3	Einflußgrößen auf Waage und Wägung.....	462
4.4	Beschreibung einzelner Massekomparatoren höchster Genauigkeit.....	464
4.4.1	Schwingende Balkenwaagen.....	466
4.4.2	Elektromagnetisch kompensierte Massekomparatoren.....	471
4.5	Literatur.....	478

5 Von der Masse abgeleitete Größen und ihre Bestimmung 480

5.0	Verwendete Formelzeichen	481
5.1	Die Dichte.....	485
5.1.1	Definition	485
5.1.2	Einheit der Dichte	485
5.1.3	Dichtebestimmung	486
5.1.4	Dichtebestimmung in der Praxis.....	491
5.2	Die Kraft	492
5.2.1	Größe und Einheit.....	492
5.2.2	Darstellung.....	492
5.2.3	Kraftmessungen in der Praxis	494
5.3	Der Druck	495
5.3.1	Größe und Einheit.....	495
5.3.2	Darstellung der Druckeinheit.....	496
5.3.3	Druckmessungen in der Praxis.....	497
5.4	Ausgewählte elektrische Größen.....	498
5.4.1	Die elektrische Stromstärke	498
5.4.2	Die elektrische Spannung.....	501
5.4.3	Der elektrische Widerstand.....	503
5.5	Literatur.....	506

6	Anhang	508
6.1	Definitionen der Basiseinheiten	509
6.2	Erklärung der 3. CGPM (1901) zur Einheit der Masse und zur Definition des Gewichts; konventioneller Wert von g_n	510
6.3	Empfehlung 4 (CI-1993) des CIPM	511
6.4	Teile und Vielfache der Masseneinheit im internationalen Einheitensystem (SI)	512
6.5	Masseneinheiten außerhalb des SI	513
6.5.1	Im gesetzlichen Meßwesen Deutschlands erlaubt.....	513
6.5.2	Unabhängig von den SI-Basiseinheiten definiert.....	513
6.5.3	Früher in speziellen Bereichen verwendet	513
6.5.4	In der Astronomie verwendet.....	513
6.5.5	Einige nicht-metrische Masseneinheiten.....	514
6.6	Atommassen der Elemente mit einem einzigen natürlichen Isotop	517
6.7	Die fundamentalen Teilchen der 3 Generationen	518
6.8	Einige beobachtete Hadronen	519
6.9	Fallbeschleunigung	520
6.9.1	Fallbeschleunigung und Höhe über dem Meeresspiegel einiger ausgesuchter Städte	520
6.9.2	Gebrauchszonen für fallbeschleunigungsabhängige Waagen	525
6.10	International empfohlene Formel für die Luftdichte	525
6.10.0	Verwendete Formelzeichen.....	525
6.10.1	International empfohlene Formel für die Luftdichte.....	526
6.10.2	Literatur.....	531
6.11	Wasserdichte	531
6.12	Fehlergrenzen für Gewichtstücke im gesetzlichen Meßwesen	532
6.13	Dichtegrenzen für Gewichtstücke im gesetzlichen Meßwesen	533
6.14	Bedeutende Städte in über 1000 m Höhe	534
6.15	Einige Geschichtszahlen	535
6.16	Lebensdaten einiger bedeutender Persönlichkeiten	536
	Weiterführende Literatur	538
	Bildnachweis	545
	Register	549

This Page Intentionally Left Blank

1 Einführung

Die Bestimmung des Gewichts bzw. der Masse eines Körpers gehört zu den ältesten Meßtechniken der Menschheit. Spätestens mit dem Aufkommen des Warenhandels war für die Berechnung des Preises für ein Handelsgut die Bestimmung seiner Masse notwendig. Im Handel spricht man häufiger vom Gewicht als von der Masse einer Ware. Die Unterscheidung zwischen Masse und Gewicht ist im Alltag zwar wenig, in der Metrologie jedoch sehr bedeutsam. Denn das Gewicht eines Gegenstandes ist die Gewichtskraft, mit der die Gravitationsanziehung der Erde auf den Gegenstand wirkt. Diese Gewichtskraft hängt daher von der lokalen Fallbeschleunigung, aber auch vom herrschenden Luftauftrieb ab. Die Masse hingegen ist eine Eigenschaft, die unabhängig von äußeren Kräften oder Einflüssen jedem Gegenstand zukommt. Bereits im Mittelalter wurde sie als „*quantitas materiae*“ (Menge an Materie) beschrieben, aber erst Newton hat die Masse als eine meßbare, von der Kraft unabhängige Größe eingeführt.

Obwohl der physikalische Begriff der Masse bis heute nicht restlos geklärt ist, hat man eine ausgezeichnete Wägetechnik entwickelt, mit der man z.B. Differenzen von weniger als 0,1 μg zwischen Massennormalen von 1 kg feststellen kann; das entspricht einer relativen Auflösung bzw. Unsicherheit von 10^{-10} . Mit Quarzwaagen lassen sich sogar Massedifferenzen von ca. 0,1 pg (10^{-16} kg) feststellen. Auch bei Vergleichen zwischen zwei Atommassen in einer Ionenfalle wurden relative Unsicherheiten von 10^{-10} erreicht. Die genaue Angabe einer Atommasse in der Einheit Kilogramm ist bisher jedoch nur auf indirektem Wege möglich. Denn im Unterschied zu wägbaren Gegenständen hat ein Atom die sehr kleine Masse von ca. 10^{-26} kg. Die oben angegebenen Unsicherheiten für die Differenzen zwischen zwei Atommassen entsprechen dann 10^{-36} kg. Das bisher kleinste nachgewiesene materielle Teilchen ist das Elektron (sowie sein Antiteilchen, das Positron) mit einer Masse von ca. 10^{-30} kg.

Die Massebestimmung großer Massen ist hingegen von bescheidenerer Genauigkeit. Bei 100 Tonnen liegt die relative Unsicherheit schon bei 10^{-4} . Sehr große Massen, wie etwa Himmelskörper, lassen sich nur durch Vergleich mit ähnlich großen Körpern ermitteln, deren Masse ebenfalls nicht mehr direkt bestimmt werden kann. Die bisher genaueste Massebestimmung – relativ zur Sonnenmasse – konnte mit einer relativen Unsicherheit von 4×10^{-4} an einem Pulsar vorgenommen werden, der aus zwei Neutronensternen besteht. Die Sonnenmasse beträgt etwa 10^{31} kg und ist auch nur auf ca. 10^{-3} bis 10^{-4} genau bekannt – etwa so genau wie die Gravitationskonstante. Die Masse einer Galaxie oder gar die des gesamten Weltalls wird aufgrund von Modellen abgeschätzt. Den Bereich der Massebestimmung im experimentell-wissenschaftlichen Sinne würde man daher zwischen

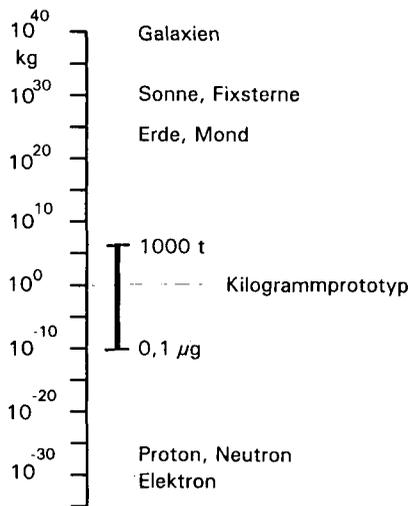


Bild 1.1. Bereich der in der Natur vorkommenden Masse (Bereich der Wägetechnik: $0,1 \mu\text{g}$ bis 1000 t).

Elektron und Fixsternen ansiedeln, einem Massebereich, der etwa 60 Größenordnungen umfaßt (s. Bild 1.1).

Für den Bereich der direkt zugänglichen Gegenstände ist die Waage das Meßgerät zur Bestimmung der Masse – oder besser: zum Vergleich zwischen der bekannten Masse eines Normal und der zu bestimmenden Masse eines Wägegutes oder eines anderen Normal. Die Bauformen der Waagen haben sich erst seit etwa 1970 wesentlich verändert. Heute sind elektronische Waagen, die statt Balken oder Hebelwerke eine Wägezelle besitzen, weit verbreitet. Solche Wägezellen sind kompakte Einheiten, die die aufgebrachte Gewichtskraft nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien in ein elektrisches Signal umformen. Eine elektronische Waage besteht im wesentlichen aus der Waagschale, einer elektrischen Anzeigevorrichtung und einem Gehäuse, das die Wägezelle und elektronische Bauteile enthält. Für höchste Genauigkeitsansprüche werden aber auch heute noch Balkenwaagen verwendet: die Massekomparatoren oder Komparatorwaagen. Ein solcher Komparator besitzt außer dem Waagebalken ein elektromagnetisches System zur Kompensation und Anzeige für einen Bruchteil der gesamten Gewichtskraft. Mit einem solchen hybriden System können die oben genannten Auflösungen von ca. 10^{-10} erreicht werden.

Die derzeit steigende Verbreitung von Waagen ist unter anderem darauf zurückzuführen, daß heute immer mehr Güter nach ihrer Masse gehandelt und abgerechnet werden. Früher waren neben der Masse noch andere physikalische Größen, wie etwa das Volumen, aber auch die stückweise Berechnung, Basis für den Preis beim Verkauf von Gütern. Auch in Forschung und Entwicklung gewinnen Analysen, die auf Massebestimmungen beruhen, immer größere Bedeutung. In diesem Buch soll ein möglichst umfassender Überblick über die Problematik der Massebestimmung gegeben werden.

Kapitel 2 behandelt die Masse als physikalische Größe mit Ausführungen über den Massebegriff in Geschichte und Gegenwart, über die Einheit der Masse als eine der Basisgrößen im SI-System und über Arbeiten zu einer Neudefinition der Masseneinheit, des Kilogramm.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Bestimmung der Masse. Zunächst wird die historische Entwicklung beschrieben. Danach folgen grundlegende Ausführungen über Massennormale,

Methoden der Massebestimmung und über die Massebestimmung mit Waagen. Die Massebestimmung in der Anwendung wird in den Unterkapiteln: Vakuumwägung, Massebestimmung in der Praxis und Massebestimmung unter besonderen Bedingungen behandelt.

In Kapitel 4, Massekomparatoren, werden – nach einer Einführung in die physikalischen Prinzipien der Balkenwaage – einzelne Massekomparatoren beschrieben.

In Kapitel 5 werden die von der Masse abgeleiteten Größen und ihre Stellung im SI-System dargestellt.

Im Anhang schließlich sind einige Daten zusammengestellt, die für das Verständnis, aber auch für die Massebestimmung in der Praxis nützlich sein können.

This Page Intentionally Left Blank

2 Masse als physikalische Größe

Kant bezeichnete die Masse als das „eigentlich Empirische der sinnlichen und äußeren Anschauung“. Wir würden heute sagen, die Masse ist eine zentrale Größe der physikalischen Forschung. In der Tat steht am Beginn der experimentellen Naturwissenschaft die Entdeckung der Masse als physikalische Größe und Gegenstand der Forschung. Über ihre Bedeutung in der klassischen Mechanik hinaus spielt die Masse eine wichtige Rolle auch in der Relativitätstheorie, in der Teilchenphysik und in anderen Disziplinen der Physik. Im Handel hat die Masse eine viel längere Geschichte als in der Forschung. Daher ist die Wahl der Einheit der Masse, das Kilogramm, und ihre Realisierung durch eine materielle Verkörperung auch heute noch von den Erfordernissen des Warenverkehrs geprägt. In der modernen Physik verwendet man jedoch inzwischen andere, auf atomare Konstanten bezogene Masseneinheiten, wie die atomare Masseneinheit oder das Elektronenvolt (geteilt durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit). Um eine bessere Verbindung zwischen Forschung und Alltag herzustellen, aber auch um die Unveränderlichkeit der Masseneinheit künftig zu erhalten, sucht man heute nach Wegen, das Kilogramm an eine physikalische Konstante anzubinden.

Im Abschnitt 2.1 wird zunächst die Entwicklung des Massebegriffs aus den antiken Vorstellungen über den Urstoff und die Atome über den mittelalterlichen Begriff der *quantitas materiae*, den Newtonschen klassischen bis zum relativistischen Massebegriff skizziert. Dann wird die heutige Vorstellung des Massebegriffs im Lichte von allgemeiner Relativitätstheorie, Quantenmechanik und Elementarteilchenphysik kurz beschrieben.

Die Masse als Basiseinheit im Internationalen System der Einheiten (SI) ist Thema des Abschnitts 2.2, Einheit der Masse. Hier werden Definition und Realisierung der Masseneinheit durch das Kilogrammprototyp behandelt, aber auch Fragen zur Unveränderlichkeit des Prototyps und die Hierarchie der Massennormale.

In Abschnitt 2.3, Arbeiten zu einer Neudefinition, wird über Projekte berichtet, die eine Anbindung der Masseneinheit an elektrische Einheiten oder an Atom- oder Fundamentalkonstanten zum Ziel haben. Auch die Auswirkungen einer Neudefinition auf das System der Basiseinheiten werden angesprochen.

2.1 Massebegriff

M. Gläser

Inhaltsverzeichnis

2.1.0	Verwendete Formelzeichen	6
2.1.1	Etymologie	8
2.1.2	Geschichte des Massebegriffs	9
2.1.2.1	Antike und Mittelalter	9
2.1.2.2	Verständnis von träger und schwerer Masse	11
2.1.2.3	Masse als empirische Gegebenheit	12
2.1.2.4	Masseerhaltung	13
2.1.2.5	Masse – Maßsystem	13
2.1.2.6	Masse – Kraft – Energie	13
2.1.2.7	Elekromagnetische Masse	14
2.1.2.8	Drei Arten der Masse	14
2.1.2.9	Relativitätstheorie	15
2.1.3	Masse in der klassischen und relativistischen Physik	15
2.1.3.1	Newtonsche Axiome und Gravitationsgesetz	15
2.1.3.2	Gravitationskonstante	16
2.1.3.3	Diskrepanz zwischen geophys. Messungen und Laborversuchen	17
2.1.3.4	Schwere und träge Masse, schwaches Äquivalenzprinzip	21
2.1.3.5	Relativitätstheorie, starkes Äquivalenzprinzip	23
2.1.3.6	Gravitationswellen	26
2.1.4	Das Problem der Masse und der Gravitation in der Teilchenphysik	26
2.1.4.1	Allgemeines	26
2.1.4.2	Das Standardmodell	29
2.1.4.3	Vereinigte Quantenfeldtheorien	32
2.1.5	Literatur	35

2.1.0 Verwendete Formelzeichen

A	relative Atommasse
a	Beschleunigung
a_0	Bohrscher Atomradius
B	Baryonenzahl

c	Lichtgeschwindigkeit
E	Energie
e	Elementarladung
F_t	Trägheitskraft
F_g	Gravitationskraft
f	Konstante
G	Gravitationskonstante
g	Fallbeschleunigung
g_s	Parameter der starken Wechselwirkung
g_w	Parameter der schwachen Wechselwirkung
H	Hamilton-Operator
h	Plancksches Wirkungsquantum
m	Masse
m_{el}	elektromagnetische Masse
m_g	schwere Masse
m_p	Masse des Protons
m_{Pl}	Planck-Masse
m_t	träge Masse
m_u	atomare Masseneinheit
n_f	Zahl der relevanten Aromen
p	Impuls
R	Radius eines Himmelskörpers
R'	Schwarzschildradius
r	Abstand, Radius
T	Schwingungsdauer
t	Zeit
u	Geschwindigkeit
α	Feinstrukturkonstante
α_λ, α_j	Amplitude eines Korrekturpotentials
α_G	Kopplungskonstante der Gravitation
α_s	Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung

α_w	Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung
β	Winkel
γ	relativistischer Faktor
Λ	Energieparameter der starken Wechselwirkung
λ	Wellenlänge
λ_G	Reichweite
μ	Kopplungsenergie bei der starken Wechselwirkung
μ_i, μ_j	relative Masse
ν	Frequenz
Ψ	Gravitationspotential
ξ	Funktion
ω_c	Zyklotronfrequenz

Der Massebegriff in der Physik ist bis heute einem ständigen Wandel unterworfen. Nach der Erkenntnis, daß man zwischen träger und schwerer Masse zu unterscheiden hat, die schwere Masse sich wiederum als eine aktive und eine passive darstellt, zeigte die Relativitätstheorie, daß sich die Masse bei hohen Geschwindigkeiten scheinbar vergrößert. Man beschränkte daher den Massebegriff auf die Ruhemasse und erweiterte statt dessen die Energie um einen zusätzlichen impulsabhängigen Term. Die Einsicht, daß Masse und Energie äquivalent sind, führte in Atom-, Kern- und Teilchenphysik zu einer Sprachregelung, in der die Masse durch das Verhältnis aus Energie E und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c , also durch E/c^2 angegeben wird. Denn für die Ermittlung der Masse eines atomaren Teilchens sind Energiebetrachtungen maßgebend. Die Massen klassischer Körper dagegen werden überwiegend mit Hilfe der Gravitationswechselwirkung ermittelt. Die klassische Newtonsche Gravitation wird jedoch heute vielfach in Frage gestellt. Man versucht, die Gravitation zu quantisieren und über eine „Quantengravitation“ zusammen mit den drei anderen Wechselwirkungen (elektromagnetische, starke, schwache) in einer einheitlichen Theorie zu beschreiben.

2.1.1 Etymologie

Das Wort *Masse* leitet sich vom lateinischen *massa* ab. *Massa* hat die Bedeutung: Klumpen aus einem homogenen Material ohne spezifische Form, wie z.B. Teig oder Metall, aber auch: Konglomerat aus Körpern. Das lateinische *massa* geht auf das griechische *massein* (kneten des Teiges) bzw. *maza* (Gerstenbrot) zurück. Über den Ursprung des griechischen *maza* gibt es noch keine Klarheit. Wahrscheinlich steht es in Verbindung mit dem hebräischen *mazza* (ungesäuertes Brot der Israeliten). Das Wort *Messe* im Sinne der christlichen Eucharistiefeyer könnte sich ebenfalls vom hebräischen *mazza* herleiten und nicht

vom lateinischen *missa*, wie mit Isidor von Sevilla (560-636) heute allgemein angenommen wird. Das englische Wort *mass* (*Mass*) steht interessanterweise für beide Bedeutungen: *Masse* und *Messe*.

Anstelle des Wortes *Masse* wurden in der Vergangenheit auch andere Worte mit ähnlicher Bedeutung verwendet, wie z.B.: *moles* (Kepler (1571-1630), Leibniz (1646-1716)), *quantitas materiae* (Newton (1643-1727)) oder *copia materiae* (Kepler).

Heute hat das Wort *Masse* neben seiner Bedeutung als physikalische Größe auch noch andere Bedeutungen, die sicher älteren Ursprungs sind, wie z.B. die der oben erwähnten lateinischen *massa*. So wird *Masse* z.B. im Sinne von Materie, Substrat verwendet, wie etwa in *Knetmasse*, *Massenbeton*, *Massenabsorptionskoeffizient*. Eine andere Bedeutung ist die von vielen gleichartigen Einzelindividuen, wie in *Menschenmasse*, *Massenabfertigung*, *Massengrab*, *Massengut*, *Massenmörder*, *Massentourismus*.

2.1.2 Geschichte des Massebegriffs

Der Begriff *Masse*, wie wir ihn heute im Sinne einer physikalischen Größe verstehen, hat sich erst in der Neuzeit, seit Isaak Newton (1643-1727), herausgebildet. Einzelne Aussagen und Annahmen, die wir heute mit dem Massebegriff verbinden, lassen sich aber auch schon früher nachweisen.

2.1.2.1 Antike und Mittelalter

Der *Erhaltungssatz der Masse* (in der klassischen Physik) findet eine Parallele bei den griechischen Naturphilosophen, z.B. in der Aussage des Anaxagoras (500–428 v. Chr.) „kein Ding entsteht oder vergeht“ [21.1] oder des Demokrit (460–371 v. Chr.): „Aus Nichts wird nichts und Nichts kann nur zum Nichts werden“ [21.2]. Auch von Empedokles (495–435 v. Chr.) und Lukrez (96–55 v. Chr.) werden ähnliche Sätze überliefert. Als einen unvergänglichen Urstoff betrachtete Thales von Milet (624–546 v. Chr.) das Wasser, Anaximenes (585–526 v. Chr.) die Luft, Heraklit (544–483 v. Chr.) das Feuer und Empedokles die vier Elemente: Wasser, Feuer, Luft und Erde. Bei Demokrit, wie auch bei Leukipp (500–440 v. Chr.) sind es die Atome, die als unvergänglich und unveränderlich angenommen werden. Aristoteles (384–322 v. Chr.) erkennt, daß nicht das Volumen eines Körpers ein Maß für die Quantität der Materie (Hyle) sein kann [21.3] und deutet damit auf eine andere, bei ihm noch unbenannte Größe hin.

Die *Schwere* als Eigenschaft der Masse, die sich in der Gewichtskraft äußert, war in der antiken Wissenschaft zwar bekannt, wurde aber selten als eine physikalische Größe beschrieben – anders als das Volumen eines Körpers. Als einer der wenigen schreibt Demokrit (auch Lukrez) den Atomen Schwere zu [21.4]. Da für ihn alle Atome aus dem gleichen Stoff bestehen, sind große Atome schwerer als kleine. Die Ursache der unterschiedlichen Dichten der Körper erklärt er dadurch, daß Körper mit geringer Dichte (er spricht von leichten Körpern) mehr leeren Raum enthalten als Körper mit hoher Dichte (schwere Körper). Denn für Demokrit gab es nur Atome und den leeren Raum, in dem diese sich befinden.

Die *Trägheit* wurde in Antike und Mittelalter nur von wenigen Denkern als Eigenschaft materieller Körper erkannt, wie z.B. von Sextus Empiricus (160-240), der einem physikalischen Körper neben Gestalt und Größe auch Widerstand und Schwere zuschreibt. Da Aristoteles die Existenz eines inneren Widerstandes der Körper gegen eine sie bewegende Kraft nicht anerkennt [21.5] und die Lehre des Aristoteles in der mittelalterlichen Philosophie beherrschend war, konnte der Begriff der Trägheit erst in der Neuzeit wieder Bedeutung erlangen. Die Neuplatoniker, wie z.B. Philo von Alexandrien (15 v. Chr. – 45), Plotin (205-270), Proklos (410-485) und Ibn Gabirol (auch Avencebrol genannt, 1020-1070), hatten der Materie eine Art Trägheit zugeschrieben, die wenig gemein hat mit dem physikalischen Begriff. Jene Trägheit resultierte aus der Vorstellung heraus, die Materie sei überwiegend bewegungslos, passiv und daher träge. Diese Eigenschaften sollen außerdem aus der räumlichen Ausdehnung folgen, durch die allein ein materieller Körper charakterisiert sei. Diese Art Trägheit und Passivität wurde als Gegenpol zur Aktivität des Geistes bzw. Gottes gesehen.

Einen Versuch, die träge Masse zu beschreiben, unternahm Jean Buridan (1300-1358), Rektor an der Universität Paris. Er wurde bekannt durch seine Theorie des *Impetus*. Der Begriff des Impetus kommt unserer Vorstellung vom Impuls bereits sehr nahe, insbesondere da er eine Funktion der Materiemenge ist.

Die *Allgemeingültigkeit des freien Falls* wird bereits von dem Byzantiner Johannes Philoponos (675-754) in seinem Aristoteles-Kommentar erkannt. Er kritisiert die Auffassung des Aristoteles über Bewegungszeiten und stellt dagegen fest, daß die Differenzen der Fallzeiten von verschiedenen schweren Körpern sehr klein seien und daher nicht von deren Gewicht abhängen.

Auch Aegidius Romanus, Lehrer an der Pariser Universität, erhob in seinem Werk „*Theoremata de Corpore Christi*“ (1276) erste Zweifel an der Mechanik des Aristoteles. Bei einem Versuch, die Transsubstantiation zu erklären, stellte er die These auf, in jedem Körper gäbe es zwei Größen (*duplex quantitas*) und zwei Dimensionsarten: determinierte und indetermierte Dimensionen. Die indetermierte Dimension sei die Größe, durch die eine Sache soundsoviel Materie (*quantitas materiae*) darstellt, die determinierte Dimension diejenige, durch die sie ein bestimmtes Volumen einnimmt. Dabei soll die „*quantitas materiae*“ dem Volumen vorausgehen. Später mußte Aegidius seine Thesen jedoch wieder zurücknehmen.

Man sollte die antike und mittelalterliche Philosophie nicht überbewerten. Mit Ausnahme weniger Forscher wie Aristarch von Samos (320-250 v. Chr.), Archimedes (285-212 v. Chr.), Eratosthenes (276-194 v. Chr.), Hipparch (190-125 v. Chr.) und Ptolemäus (100-160) haben Gelehrte der Antike keine systematischen Untersuchungen der Natur durch Messen definierter physikalischer Größen und Aufstellen mathematischer Modelle ausgeführt. In der mittelalterlichen scholastischen Philosophie kommt messende Naturforschung gar nicht vor; man interpretierte vielmehr die Welt von einem rein spekulativen Ansatz her. So sind z.B. die Substanz oder die Materie nicht quantifizierbar, es sind rein qualitative Begriffe.

Roger Bacon (1214-1294) war der erste namhafte mittelalterliche Gelehrte, der in der Erfahrung die wichtigste Quelle der Erkenntnis sah („*Oportet ergo omnia certificari per viam experientiae*“). Für diese Behauptung wurde er allerdings von seinen Ordensbrüdern (Franziskanern) von 1277 an für den Rest seines Lebens eingekerkert.

Nicolaus von Cues (1401-1464) sieht im Gebrauch der *Waage* die exakteste und verlässlichste Forschungsmethode in Medizin, Physik und Chemie [21.6].

2.1.2.2 Verständnis von träger und schwerer Masse aufgrund von Experimenten

Galileo Galilei (1564-1642) stellte den Satz auf: Alle Körper fallen (im Vakuum) gleich schnell. Dieser Satz wird heute auch als *schwache Äquivalenzprinzip* bezeichnet, denn er beinhaltet bereits die später von Newton erkannte Proportionalität zwischen träger und schwerer Masse. Ob Galilei das Fallgesetz durch Versuche an einem hohen Turm, wie er selbst in seiner Schrift „de Motu“ angibt, fand, ist jedoch nicht gesichert. Während Galilei nur mechanische Bewegungsabläufe untersuchte, ohne sich für die Kraft oder die Masse zu interessieren, äußert einer seiner Zeitgenossen, Battista Baliani (1582-1666), daß die Masse der Körper eine Doppelfunktion habe. Sie trete einerseits als „agens“ oder „pondus“, zum anderen als „passum“ oder „moles“ in Erscheinung, andere Bezeichnungen für die schwere bzw. träge Masse. Johannes Kepler (1571-1630) schreibt der Materie einen Widerstand (renitentia) zu. Auch er unterscheidet zwischen pondus und moles. Den Begriff Masse (moles) verwendet er, um eine gegenseitige Anziehung der Körper zu postulieren. Christian Huygens (1629-1695) beschreibt in seinem Werk „De vi centrifuga“ die Zentrifugalkräfte und ihre Abhängigkeit von sogenannten festen Quantitäten (*quantitates solidas*). In seinem Werk „De motu corporum ex percussione“ (1668) beschreibt er die Stoßprozesse und berücksichtigt dabei bereits die trägen Massen der Stoßpartner, ohne sie jedoch so zu benennen.

Isaac Newton (1643-1727) führt die früheren weitgehend nur raum-zeitlichen Vorstellungen von Bewegungsabläufen zu einem Modell der Mechanik, das durch Einführung des formalen Begriffs der Masse erst physikalische Vollständigkeit erhält (s. Bild 21.1). Im ersten Buch seiner „Principia mathematica“ formuliert er acht Definitionen und seine bekannten drei Axiome [21.7]. Die erste der Definitionen lautet: Die Quantität der Materie (Masse) ist das Maß derselben, das aus dem Produkt von Dichte und Volumen



Bild 21.1. Isaac Newton (1643-1727) soll bei der Betrachtung eines vom Baum fallenden Apfels zur Entdeckung des Gravitationsgesetzes inspiriert worden sein.

dargestellt wird (Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex densitate et magnitudine conjunctim). In den weiteren Erläuterungen schreibt er, daß er auch mit den Worten „corpus“ oder „massa“ die „quantitas materiae“ meint. In der Definition 3 beschreibt er die Trägheit als eine einem Körper innewohnende Kraft (Materiae vis insita est potentia resistendi...). Auch hat Newton die Proportionalität zwischen schwerer und träger Masse durch Experimente (Pendelversuche) mit einer – nach eigenen Angaben – relativen Unsicherheit von weniger als 10^{-3} aufgezeigt.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) hat die Vorstellung einer der Materie innewohnenden Kraft erweitert und die Ansicht vertreten, die Masse müsse selbst eine Kraftquelle und daher Träger und Verteiler von Aktivität und Energie sein. Er formuliert als erster die kinetische Energie (vis viva) als Produkt aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat und den Satz der Erhaltung der Gesamtenergie als Summe aus kinetischer und potentieller Energie.

George Berkeley (1685-1753) geht über Newtons Weltbild bereits weit hinaus, indem er die Bewegung eines Körpers nicht absolut, sondern nur relativ zu anderen Körpern begreift. Entsprechend lehnt er die Gravitation als eigene Kraftquelle ab, da mit ihr eine rein mathematisch beschreibbare Bewegung verbunden sei. Diese Gedanken werden später von Mach wieder aufgegriffen und von Einstein mit mathematischer Strenge in der Relativitätstheorie formuliert (s. unter 2.1.3).

Leonhard Euler (1707-1783) hat Newtons Mechanik in dem entscheidenden Punkt weiterentwickelt, daß er den Begriff der Beschleunigung klar beschrieben und Newtons 2. Axiom als erster in der uns heute geläufigen analytischen Form dargestellt hat: Kraft = Masse \times Beschleunigung. Euler definierte die Masse eines Körpers – anders als Newton – als das Verhältnis der Kraft zur Beschleunigung, die dieser Körper durch die Kraft erfährt. In der Flüssigkeitsmechanik hat Euler die Kontinuitätsgleichung aufgestellt, die zugleich ein Erhaltungssatz der Masse ist.

2.1.2.3 Masse als empirische Gegebenheit

Im 18. Jahrhundert hat man sich u.a. mit der Frage auseinandergesetzt, ob die Grundprinzipien der Mechanik notwendig oder zufällig sind. Jean Baptiste le Rond d'Alembert (1717-1783) vertrat die Ansicht, daß man diese Grundprinzipien a priori, also wie mathematische Gesetze, herleiten kann. Deshalb versuchte er, den Begriff der Kraft aus der Mechanik zu eliminieren, da die Kraft die Mechanik zu einer Erfahrungswissenschaft machen würde. Diese Frage muß auch im Zusammenhang mit Immanuel Kants (1724-1804) Darlegungen über den Raum und die Zeit gesehen werden. Kant beschreibt sie als transzendente Begriffe, das heißt als Bedingungen der Möglichkeit für die Erscheinungen in Raum und Zeit [21.8]. Sie sind daher keine empirischen Begriffe – im Gegensatz zur Materie. Diese charakterisiert er wie folgt: „Die Materie wäre im Gegensatz zur Form das, was in der äußeren Anschauung ein Gegenstand der Empfindung ist, folglich das eigentlich-Empirische der sinnlichen und äußeren Anschauung, weil es gar nicht a priori gegeben werden kann“ [21.9]. Außerdem hat Kant den Newtonschen Begriff der Trägheitskraft (vis inertiae) abgeschafft und zum nüchternen „Gesetz der Trägheit“ erklärt [21.10].

2.1.2.4 Masseerhaltung

Nach der Antike war Antoine Lavoisier (1743-1794) der erste, der das Prinzip der Erhaltung der Masse wieder herstellte. Er erkannte dieses Prinzip aus den festen Gewichtsverhältnissen bei chemischen Reaktionen. Durch Lavoisiers Arbeiten erhielt auch die Verwendung der Waage in der chemischen Analytik eine neue Bedeutung.

John Dalton (1766-1844) begründete die atomistische Theorie in der Chemie aus der Erkenntnis der multiplen Proportionen bei chemischen Verbindungen [21.11]. Er stellte die erste Tafel der relativen Atommassen auf und prägte u.a. auch den Begriff „Molekül“.

2.1.2.5 Masse – Maßsystem

Carl Friedrich Gauß (1777-1855) hat ein absolutes Maßsystem zur Messung magnetischer Kräfte entwickelt, das er auf die Basiseinheiten Länge, Zeit und Masse zurückführte [21.12]. Dieses Maßsystem fand als Gaußsches oder cgs-System Eingang in die Physik und hat durch seine Anerkennung u.a. gezeigt, daß die Masse – gemeinsam mit Länge und Zeit – als eine grundlegende physikalische Größe betrachtet wird.

2.1.2.6 Masse – Kraft – Energie

Ernst Mach (1838-1916) legte im Jahre 1867 eine neue Definition der Masse vor, die sich nur auf die Beschleunigung stützt und vom Begriff der Kraft völlig losgelöst ist [21.13]. Die Kraft wird daher als eine aus Masse und Beschleunigung abgeleitete Größe dargestellt. Machs Definition erwies sich als eine für die Praxis überaus brauchbare Definition. Auch hat Mach die beschleunigungsfreie Bewegung einer Masse als eine Bewegung im Mittel der übrigen Massen der Welt, im Gegensatz zu einem gedachten absoluten Raum interpretiert (Machsches Prinzip). Neben seiner Tätigkeit als Experimentalphysiker war er auch Philosoph und vertrat die Richtung des Empirio-kritizismus. Mach hat das heutige Selbstverständnis der Naturwissenschaften durch seine klare und radikale Abgrenzung von der traditionellen Philosophie geprägt. So hat er Vorstellungen und Begriffe abgelehnt, die aus der spekulativen scholastischen Philosophie herkommen, wie z.B. die Begriffe *Materie* und *quantitas materiae*, aber auch *Kraft*. Er hat auch dem Begriff der Kausalität seine scheinbare Naturgesetzlichkeit genommen und ihn als eine Abstraktion mit „ökonomischer Funktion“ gedeutet [21.14].

James Clerk Maxwell (1831-1879) dagegen hat umgekehrt die Masse mit Hilfe des Kraftbegriffs erklärt und diesem die Priorität gegeben [21.15]. Auch Clément de Engelmeyer (1895) und Alois Höfler (1900) sahen eher in der Kraft als in der Masse die grundlegende Größe.

Wilhelm Ostwald (1853-1932) ging noch einen Schritt weiter als Mach und führte die Masse auf die Energie zurück und vermutete bereits im Jahre 1902 eine universelle Proportionalität zwischen Masse und Energie.

2.1.2.7 Elektromagnetische Masse

Maxwell hat durch die Aufstellung der nach ihm benannten und allgemein anerkannten Gleichungen der Elektrodynamik (1862) die Basis für das lange Zeit ungelöste Problem der sogenannten *elektromagnetischen Masse* geschaffen (s. unter 2.1.4). Joseph John Thomson (1856-1940) leitete für eine in einem elektrischen Feld bewegte, geladene Kugel eine elektromagnetische Masse her, die allein Funktion der elektrischen Elementarladung, des Radius der Kugel und der Lichtgeschwindigkeit ist. Er hat die Vermutung geäußert, daß die Trägheit allein auf einen elektromagnetischen Effekt zurückzuführen sei. Seine Formel hatte allerdings einen falschen Zahlenfaktor. Oliver Heaviside (1850-1925) leitete die richtige klassische Formel her (s. Gl.(21.18)), Wilhelm Wien (1864-1928) die allgemeinere relativistische Formel (s. Gl.(21.21)), Max Abraham (1875-1922) Formeln für die transversale und die longitudinale elektromagnetische Masse. Abraham kommt zu der Auffassung, die Masse des Elektrons sei rein elektromagnetischer Natur. Es kommt jedoch zu Widersprüchen bei der Berechnung der Selbstenergie des Elektrons. Auch haben sich Henri Poincaré (1854-1912), Max Born (1882-1970), Leopold Infeld (1898-1968), Paul Dirac (1902-1984), John Wheeler (geb.1911) und Richard Feynman (1918-1988) mit diesem Problem befaßt. Eine relativistisch korrekte und widerspruchsfreie Beschreibung haben verschiedene Autoren, u.a. Enrico Fermi (1901-1954), zuletzt F. Rohrlich [21.16], vorgelegt, ohne daß die Mehrzahl der Physiker dies zur Kenntnis nahm.

2.1.2.8 Drei Arten der Masse

In der Newtonschen Mechanik lassen sich nach Hermann Bondi (geb. 1919) formal drei verschiedene Arten der Masse unterscheiden [21.17]:

- Die träge (inerte) Masse
- Die aktive Gravitationsmasse
- Die passive Gravitationsmasse (schwere Masse)

Dabei wird eine universelle Proportionalität zwischen diesen drei Arten der Masse angenommen. Die Proportionalität zwischen der trägen Masse und der passiven Gravitationsmasse wurde seit Newton durch zahlreiche Versuche mit steigender Genauigkeit überprüft, z.B. von Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), Loránd von Eötvös (1848-1919), Robert Henry Dicke (geb.1916) und V.B. Braginski. Diese Proportionalität, die auch *Äquivalenzprinzip* genannt wird, wurde für Albert Einstein (1879-1955) die grundlegende Voraussetzung für die allgemeine Relativitätstheorie. Die Proportionalität zwischen aktiver und passiver Gravitationsmasse, die aus dem dritten Newtonschen Axiom folgt, wurde zum Gegenstand von Spekulationen über Massen mit negativem Vorzeichen bzw. über abstoßende Gravitationskräfte (August Föppl (1854-1924)[21.18], Arthur Schuster (1850-1934) [21.19] und H. Bondi [21.17]). Die Möglichkeit abstoßender Gravitationskräfte wird heute wieder im Zusammenhang mit den noch unbekanntenen Gravitationswechselwirkungen zwischen Teilchen und Antiteilchen diskutiert (s. unter 2.1.4).

2.1.2.9 Relativitätstheorie

Einstein entwickelte im Jahre 1905 aus der Maxwell-Hertzschen Theorie der Elektrodynamik u.a. die bekannte relativistische Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse [21.20] (s. Gl. (21.9)). Diese ist inzwischen durch zahlreiche Experimente in Atom-, Kern- und Hochenergiephysik bestätigt worden. Im gleichen Jahre hat Einstein auch die allgemeine Proportionalität zwischen Masse und Energie: $E=mc^2$ aufgezeigt [21.21]. Dadurch wurden die zwei Erhaltungssätze der Masse und der Energie der klassischen Physik auf einen Erhaltungssatz (Masse oder Energie) und die Einsteinsche Masse-Energie-Beziehung reduziert. Diese Beziehung wurde in der modernen Physik die überzeugendste Erklärung für die an atomaren Teilchen beobachteten Massedifferenzen. Im Jahre 1916 veröffentlichte Einstein seine Arbeit über die allgemeine Relativitätstheorie [21.22], in der die Unterscheidung zwischen träger Masse und passiver Gravitationsmasse aufgehoben wird (starkes Äquivalenzprinzip). Dies führte zu weitreichenden Konsequenzen für unser physikalisches Weltbild, insbesondere in der Astronomie. Eine Bestätigung von Einsteins Vorhersage der Lichtablenkung im Schwerefeld eines Sterns wurde bereits von Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) durch Beobachtungen an der Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 erbracht. Die seit etwa 1860 bekannte Periheldrehung des Merkur erhielt jetzt ihre Erklärung. Die vorhergesagte Rotverschiebung konnte jedoch erst 1960 und 1965 mit Hilfe des Mößbauereffektes sicher bestätigt werden (s. unter 2.1.3).

2.1.3 Masse in der klassischen und relativistischen Physik

2.1.3.1 Newtonsche Axiome und Gravitationsgesetz

Neben seiner – eher trivialen – Definition der Masse aus der Dichte und dem Volumen eines Körpers führte Newton die Masse durch zwei weitere, physikalisch voneinander unabhängige Definitionen ein. Die erste – implizite – Definition der Masse wird in seinem zweiten Axiom angegeben:

„Die Änderung einer Bewegung ist proportional der einwirkenden bewegenden Kraft, und sie erfolgt entlang der geraden Linie, in der jene Kraft wirkt.“ (Mutationem motus poportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.)

Der Proportionalitätsfaktor in einer entsprechenden Gleichung, die sich für dieses Axiom aufstellen läßt, wird (nach dem auch *Trägheitsgesetz* genannten ersten Newtonschen Axiom) als die *träge Masse* m_t eingeführt:

$$F_t = m_t a \tag{21.1}$$

F_t Trägheitskraft, a Beschleunigung.

Die zweite Definition der Masse liefert das Gravitationsgesetz:

$$F_g = G \frac{m_{g1} m_{g2}}{r^2} \quad (21.2)$$

F_g Gravitationskraft, G Gravitationskonstante, m_{g1} , m_{g2} je eine *schwere Masse*, r Abstand zwischen den Massenschwerpunkten. Die Kräfte F_t und F_g kommen auf ganz unterschiedliche Weise zustande: F_t steht in Zusammenhang mit dem Bewegungszustand eines einzelnen Körpers der Masse m_t . Gl. (21.1) scheint daher auch gültig zu sein, wenn keine anderen Körper oder Massen vorhanden sind. F_g dagegen beschreibt eine statische, von ihrem Abstand abhängige Kraft zwischen zwei Körpern mit den Massen m_{g1} und m_{g2} . F_g ist daher einem Kraftfeld mit der Feldstärke F_g/m_{g1} bzw. F_g/m_{g2} zugeordnet. Man hat nun die Gravitationskonstante so festgelegt, daß für einen Körper träge und schwere Masse den gleichen Wert und die gleiche Einheit haben: $m_t = m_g$.

2.1.3.2 Gravitationskonstante

Experimentelle Bestimmungen der Gravitationskonstante G (s. Tab. 21.1) begannen im 18. Jahrhundert (s. unter 3.7.3.2). Pierre Bouguer (1698-1758) und Charles M. de La Condamine (1701-1774) haben 1738 an verschiedenen Stellen eines genau vermessenen Bergs in Peru durch Pendelversuche erstmals die Gravitationskonstante bestimmt. Ähnliche geophysikalische Messungen wurden bis heute, u.a. in australischen und anderen Bergwerken durch Stacey, Tuck u.a. [21.23], ausgeführt. Im Jahre 1873 setzte eine kurze Periode von G -Experimenten ein, bei denen Balkenwaagen in Laborversuchen verwendet wurden. Am erfolgreichsten jedoch war die Torsionswaage, die erstmals 1798 von Henry Cavendish (1731-1810) eingesetzt wurde. Die Messungen von Luther und Towler im Jahre 1982 [21.24], bei denen die dynamische Pendelmethode angewandt wurde (s. Bild 21.2), weist die bisher geringste Unsicherheit auf. Ihr Ergebnis ist daher im Jahre 1986 (mit erhöhter Unsicherheit) in die Liste der physikalischen Fundamentalkonstanten mit dem Wert:

$$G = (6,67259 \pm 0,00085) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$$

übernommen worden [21.25].

Eine Drehwaage ohne Torsionsfaden wurde in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelt (s. Bild 21.3) [21.26]. Diese Drehwaage ist auf einem Quecksilberbad gelagert. Durch eine Elektrodenanordnung nach Art eines Maxwellschen Quadrantenelektrometers wird das gravitationsbedingte Drehmoment kompensiert. Mit der Abweichung vom CODATA-Wert um ca. 0,6 % (Unsicherheit 0,008 %) bestätigt das Ergebnis eher die Werte, die durch geophysikalische Messungen erhalten wurden (s. Tab.21.1). Mit einer ähnlichen Torsionswaage [21.27] und mit einem Fabry-Pérot Mikrowellenresonator [21.28] wurden bis auf 10^{-4} die früheren Ergebnisse der Laborversuche bestätigt.

Eine große Zahl von G -Experimenten wurde ausgeführt, um entweder mögliche Kopplungen der Gravitationskonstante mit anderen Einflußgrößen oder andere Gesetz-

mäßigkeiten der Gravitationswechselwirkung zu untersuchen. Dazu gehören Versuche zu möglichen elektromagnetischen oder nuklearen Kopplungen, zu Permeabilität, Absorption [21.29] (s. Bild 21.4) und Abschirmung der Gravitation, wie auch Temperatur-, Richtungs- und Zeitabhängigkeit von G . Eine Reihe von Versuchen wird zur Erhärtung spezieller kosmologischer oder quantenmechanischer Modelle ausgeführt, wie etwa Experimente zum Nachweis einer spontanen Materiezunahme („spontaneous matter creation“), einer neuen, zusätzlichen Gravitationswechselwirkung mit geringer Reichweite („fünfte Kraft“, s.u.) oder der Vermutung, daß die Gravitationskraft auch zwischen Materie und Antimaterie anziehend und nicht etwa abstoßend wirkt (s. unter 2.1.4).

Keines dieser Experimente ist bis heute zu einem Ergebnis gelangt, das die Gültigkeit des Newtonschen Gravitationsgesetzes, erweitert durch die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, ernsthaft in Frage stellen würde.

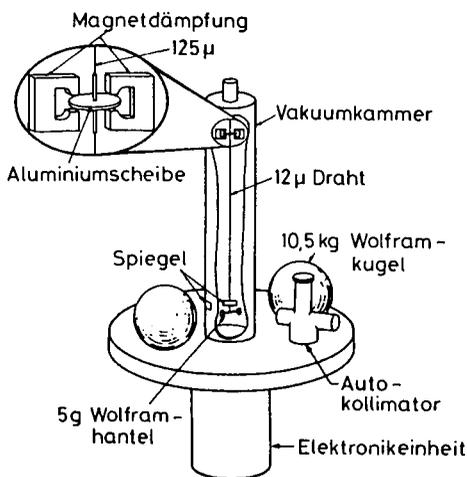


Bild 21.2. Torsionswaage, mit der Luther und Towler im Jahre 1982 die Gravitationskonstante mit der bisher geringsten Unsicherheit gemessen haben [21.24].

2.1.3.3 Diskrepanz zwischen geophysikalischen Messungen von G und Laborversuchen

Messungen der Gravitationskonstante in Bergwerken [21.30] und Bohrlöchern [21.31] bis zu 2000 m Tiefe haben systematische Abweichungen bis zu ca. 1% (s. Tab.21.1) von den in Laborversuchen (s.o.) ermittelten Werten von G gezeigt. Unabhängig von diesen Ergebnissen hatte Fujii im Jahre 1971 die Möglichkeit von Abweichungen vom Newtonschen Gravitationsgesetz vermutet [21.32]. Für diese Abweichung soll ein hypothetisches Austauschteilchen, das „Dilaton“ mit einer Reichweite zwischen 10 m und 1 km verantwortlich sein.

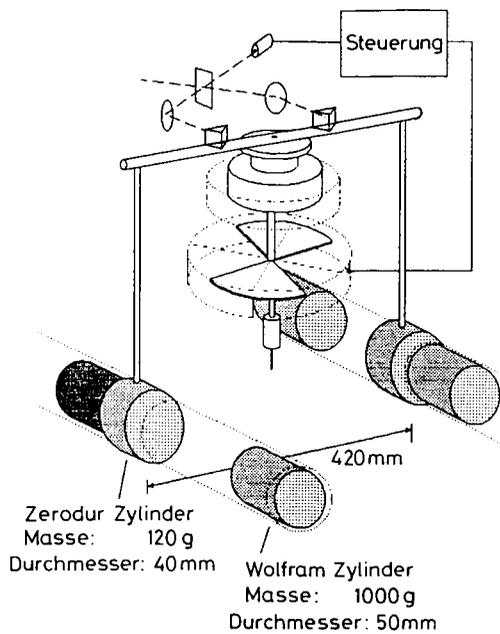


Bild 21.3. Torsionswaage der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt [21.26].

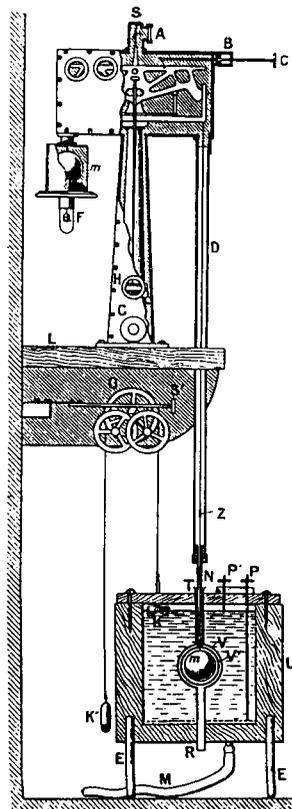


Bild 21.4. Balkenwaage, mit der Q. Majorana im Jahre 1930 Versuche zu einer möglichen Absorption der Gravitation durchführte. Eine an der Waage hängende Bleikugel m konnte zur Abschirmung im Behälter U mit Quecksilber umgeben werden, das über die Leitung M hineingepumpt oder abgelassen wurde [21.29].