

**Birgit Bender**

Methoden zur Messung der  
Lichtgeschwindigkeit und Aspekte zur  
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

**Examensarbeit**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 1995 Diplomica Verlag GmbH  
ISBN: 9783832427733

**Birgit Bender**

# **Methoden zur Messung der Lichtgeschwindigkeit und Aspekte zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit**

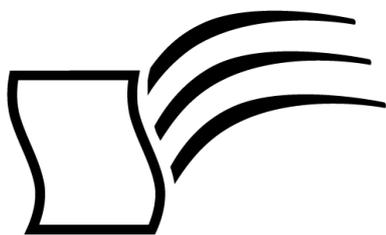


---

Birgit Bender

# Methoden zur Messung der Lichtgeschwindigkeit und Aspekte zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Staatsexamensarbeit  
an der Universität Koblenz-Landau, Abt. Koblenz  
Juli 1995 Abgabe



***Diplom.de***

Diplomica GmbH \_\_\_\_\_  
Hermannstal 119k \_\_\_\_\_  
22119 Hamburg \_\_\_\_\_

Fon: 040 / 655 99 20 \_\_\_\_\_  
Fax: 040 / 655 99 222 \_\_\_\_\_

agentur@diplom.de \_\_\_\_\_  
www.diplom.de \_\_\_\_\_

ID 2773

Bender, Birgit: Methoden zur Messung der Lichtgeschwindigkeit und Aspekte zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit / Birgit Bender - Hamburg: Diplomica GmbH, 2000  
Zugl.: Koblenz, Universität, Staatsexamen, 1995

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH  
<http://www.diplom.de>, Hamburg 2000  
Printed in Germany

„Die meisten Bücher über Wissenschaft, die für den Laien Verständlichkeit beanspruchen, gehen mehr darauf aus, den Leser zu beeindrucken als ihm die elementaren Ziele und Methoden klar zu machen. Wenn der intelligente Laie ein paar solche Bücher in die Hand bekommen hat, so wird er völlig entmutigt. Sein Ergebnis ist: „Ich bin zu schwachköpfig und muß es aufgeben.“ [...] Mein Vorschlag: Kein solches Buch sollte gedruckt werden, bevor festgestellt wird, daß es von einem intelligenten Laien verstanden und geschätzt wird.“

*Albert Einstein*

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
1. Einleitung .....	1
2. Grundlagen zum Verständnis der Arbeit .....	5
2.1 Das elektromagnetische Spektrum .....	5
2.2 Lichttheorien .....	6
2.3 Beeinflussungsfaktoren der Lichtgeschwindigkeit .....	9
2.3.1 Die Brechung des Lichtes .....	9
2.3.2 Gruppen- und Phasengeschwindigkeit .....	12
2.4 Schlußbemerkung zu Kapitel 2 .....	14
3. Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit ...	16
3.1 Tabellarische Übersicht .....	16
3.2 Frühe Versuche zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit .....	18
3.3 Astronomische Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit .....	20
3.3.1 Die Methode von Olaf Römer .....	20
3.3.2 Das Verfahren von Bradley .....	36
3.3.3 Bemerkung zu den astronomischen Methoden .....	41
3.4 Mechanische Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit .....	42
3.4.1 Die Zahnradmethode .....	42
3.4.2 Die Drehspiegelmethode .....	46
3.4.3 Die Methode des rotierenden Prismas .....	54

3.5	Moderne Methoden zur direkten Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit .....	58
3.5.1	Die Kerr-Zelle .....	58
3.5.2	Das Geodimeter .....	62
3.5.3	Die Pockels-Zelle .....	65
3.5.4	Die Shoranmethode .....	67
3.5.5	Die Ultraschallzelle .....	69
3.5.6	Ein selbst erfahrbarer Effekt der Lichtgeschwindigkeit .....	73
3.6	Indirekte Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit .....	75
3.6.1	Die Entdeckung von Maxwell .....	75
3.6.2	Die Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit nach Hertz .....	78
3.6.3	Der Hohlraumresonator .....	79
3.6.4	Rotationsspektren .....	83
3.6.5	Moderne Lasermethoden .....	83
4.	Aspekte zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit .....	85
4.1	Das Michelson-Interferometer (Äthertheorie) ....	86
4.2	Erklärung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nach der Relativitätstheorie .....	95
4.2.1	Das klassische Relativitätsprinzip .....	95
4.2.2	Die Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante .....	97
4.2.3	Bezugssysteme und die relative Zeit .....	98
4.2.4	Zeitdilatation .....	100
4.2.5	Der verkürzte Raum .....	108
4.2.6	Die Raum-Zeit .....	111
4.2.7	Die Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit .....	114

---

5. Durchführung eines Versuchs zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit .....	117
5.1 Versuchsaufbau .....	117
5.2 Versuchsdurchführung .....	122
5.3 Meßergebnisse .....	128
5.3.1 Fehlerklassifizierung .....	129
5.3.2 Fehlerrechnung .....	132
5.3.3 Messungen in der Luft .....	134
5.3.4 Messungen in destilliertem Wasser .....	136
5.3.5 Messungen in Glycerin .....	143
5.4 Fazit ..	143
Literaturverzeichnis .....	146
Quellenverzeichnis .....	150
Versicherung .....	151

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Brechung .....	10
Abbildung 2:	Prinzip zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach dem Verfahren von Römer .....	23
Abbildung 3:	Grafische Darstellung der mittleren Umlaufzeit des Mondes Io .....	31
Abbildung 4:	Skizze zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit nach Römer .....	34
Abbildung 5:	Aberration des Lichtes .....	38
Abbildung 6:	Minimale und maximale Aberration des Lichtes .....	40
Abbildung 7:	Die Zahnradmethode nach Fizeau .....	43
Abbildung 8:	Die Drehspiegelmethode nach Foucault ...	47
Abbildung 9:	Die Methode des rotierenden Prismas nach Michelson .....	55
Abbildung 10:	Kerr-Zelle .....	60
Abbildung 11:	Lichtgeschwindigkeitsmessung mit der Kerr-Zelle .....	61
Abbildung 12:	Lichtgeschwindigkeitsmessung mit der Pockels-Zelle .....	67
Abbildung 13:	Lichtgeschwindigkeitsmessung mit Laser und Ultraschallzelle .....	71
Abbildung 14:	Der Hohlraumresonator .....	79
Abbildung 15:	Schallgeschwindigkeit – relativ betrachtet .....	85
Abbildung 16:	Einfluß des Äthers auf die Lichtgeschwindigkeit .....	89
Abbildung 17:	Das Michelson-Interferometer .....	91
Abbildung 18:	Skizze für das Lichtbündel 2 .....	92
Abbildung 19:	Gleichzeitigkeit von Ereignissen in verschiedenen Bezugssystemen .....	99
Abbildung 20:	Zeitdilatation .....	102

Abbildung 21:	Längenkontraktion .....	109
Abbildung 22:	Foto des Versuchsaufbaus .....	118
Abbildung 23:	Blockschaltbild zum Phywe- Lichtgeschwindigkeitsmeßgerät .....	120
Abbildung 24:	Phasenlage des X- und Y-Signals, dargestellt anhand von Sinuskurven ....	124
Abbildung 25:	Phasenlage des X- und Y-Signals, dar- gestellt anhand von Lissajous-Figuren .	127
Abbildung 26:	Foto des Versuchsaufbaus zur Durch- führung der Lichtgeschwindigkeits- messung in Flüssigkeiten .....	137
Abbildung 27:	Schematische Darstellung der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Flüssigkeiten .....	138

**Abkürzungsverzeichnis**

A	Ampere
Abb.	Abbildung
AE	astronomische Einheit
c	Lichtgeschwindigkeit
C	Coulomb
cm	Zentimeter
d	Tage
Diff.	Differenz
GHz	Gigahertz
He	Helium
Hg	Quecksilber
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
LW	heutiger Literaturwert
m	Meter
M.	Medium
mbar	Millibar
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
nm	Nanometer
$\mu$ s	Mikrosekunde
N	Newton
Ne	Neon
nm	Nanometer
Pos.	Position
s	Sekunde
u. a.	und andere
VA	Verfinsterungsanfang des Mondes Io
VE	Verfinsterungsende des Mondes Io

---

Anmerkung: Die hier nicht aufgeführten, in der Arbeit verwendeten Formelsymbole sind im Text definiert.

## 1. Einleitung

Der dänische Astronom Olaf Römer<sup>1</sup> (1644-1710) fand als erster Wissenschaftler konkrete Anhaltspunkte für eine endliche Geschwindigkeit des Lichtes. Im Jahre 1676 ermittelte er die Lichtgeschwindigkeit aus astronomischen Beobachtungen des Planeten Jupiter und dessen Mond Io. Römer gab die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes mit etwa 214.000 km/s an.<sup>2, 3, 4</sup> Mit dieser Angabe lag er um fast 86.000 km/s bzw. um ca. 29% unter dem heutigen offiziellen Wert von 299.792,458 km/s.<sup>5</sup>

Die heutige Hochtechnologie hat den Wert der Lichtgeschwindigkeit so exakt bestimmt, daß im Oktober 1983 die Verfahrensweise umgekehrt werden konnte. Statt die Lichtgeschwindigkeit zu messen, mißt man heute mit der Lichtgeschwindigkeit! Die XVII. internationale Generalkonferenz für Maße und Gewichte beschloß, daß der Meter die Länge der Strecke ist, die das Licht im Vakuum während der Dauer von exakt  $\frac{1}{299.792.458}$  Sekunden durchläuft.<sup>6</sup> Die Lichtgeschwindigkeit ist damit seit 1983 das neue Längennormal und per Definition auf den oben genannten Wert

---

<sup>1</sup> Für Olaf Römers Namen existieren in der Literatur unterschiedliche Schreibweisen, wie z. B. Ole Römer, Ole Roemer, Olaf Rømer, Olaus Römer oder Ole Rømer.

<sup>2</sup> Vgl. Weinmann, Karl Friedrich: Die Lichtgeschwindigkeit – ein historischer Überblick. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU), 29. Jahrgang 1976, Heft 8, Seite 456-457.

<sup>3</sup> Vgl. auch Niedrig, Heinz (Herausgeber): Bergmann-Schaefer; Lehrbuch der Experimentalphysik. Optik. Band 3, 9. Auflage, Berlin - New York 1993, Seite 191.

<sup>4</sup> Vgl. auch Gliederungspunkt 3.3.1.

<sup>5</sup> Vgl. Gerthsen, C.; Vogel, H.: Physik. Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen, 17. Auflage, Berlin - Heidelberg - New York 1993, Seite 473.

<sup>6</sup> Laufzeitdefinition des Meters.

festgelegt.<sup>7</sup> Das neue Längennormal ist wesentlich genauer als seine Vorgänger, das Urmeter und die Wellenlängendefinition von 1960. Es definiert die Basiseinheit Meter indirekt über die Zeitmessung, die heute mit Hilfe von Atomuhren mit einer kaum faßbaren Genauigkeit von  $10^{-14}$  Sekunden erfolgen kann, viel genauer als die Messung der Länge einer Strecke. Die neue Meterdefinition macht sich diese extreme Präzision der Zeitmessung zunutze, indem sie die hohe Genauigkeit der Zeitmessung mittels der Lichtgeschwindigkeit auf die Längenmessung überträgt. Die Neudefinition des Meters ist, wie sich später herausstellen wird, eine direkte Anwendung der Universalität der Lichtgeschwindigkeit<sup>8</sup> und damit der Relativitätstheorie.

Durch die neue Meterdefinition ist die Messung von  $c$  nur noch von historischem Interesse, da die Lichtgeschwindigkeit selbst die Längeneinheit Meter definiert, in der vor 1983 die Lichtgeschwindigkeit gemessen wurde. Eine Präzisionsmessung der Lichtgeschwindigkeit liefert in Zukunft also nicht mehr zusätzliche Informationen bezüglich der Lichtgeschwindigkeit, sondern hilft, die Längeneinheit Meter noch genauer festzulegen. Die Festlegung der Lichtgeschwindigkeit hat ebenfalls zur Folge, daß es keinen Sinn macht, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes genauer als auf einen Meter in der Sekunde, womöglich auf Zentimeter oder Millimeter, anzugeben.<sup>9, 10</sup>

---

<sup>7</sup> Vgl. Bayer-Helms, Friedrich: Neue Definition der Längeneinheit Meter. In: Die Umschau, 84. Jahrgang 1984, Heft 3, Seite 92-93.

<sup>8</sup> Vgl. Gliederungspunkt 4.2.

<sup>9</sup> Vgl. Breuer, Hans: dtV-Atlas zur Physik. Tafeln und Texte, Band 1, 3. Auflage, München 1987, Seite 165.

<sup>10</sup> Vgl. auch Fritzschn, Harald: Eine Formel verändert die Welt, 3. Auflage, München 1990, Seite 149-151.

Diese Arbeit soll zeigen, wie langwierig der Weg bis zu einer so genauen Definition der Lichtgeschwindigkeit war und wie die Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit andere wichtige physikalische Erkenntnisse nach sich zog. Es soll aufgezeigt werden, wie die Lichtgeschwindigkeit ermittelt wurde, als den Wissenschaftlern noch keine komplizierte Labor- und Meßtechnik zur Bestimmung der unvorstellbar schnellen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes zur Verfügung stand, und wie trotzdem die Lichtgeschwindigkeit schon im vorigen Jahrhundert mit erstaunlicher Genauigkeit ermittelt werden konnte. Darüber hinaus sollen die neueren, noch genaueren Methoden zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit vorgestellt werden, die ein anderes Phänomen zutage treten ließen, nämlich die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und damit die Phänomene der Relativitätstheorie. Diese sogenannte Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gab den Physikern im vorigen Jahrhundert kaum zu lösende Rätsel auf. Sie konnten nicht erklären, warum sich ein Lichtstrahl, obwohl es sich hierbei nach damaliger Vorstellung ausschließlich um eine Wellenerscheinung handelte, immer mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitet, unabhängig davon, ob sich die Lichtquelle bewegt oder in welche Richtung des Raumes das Licht in bezug auf ein hypothetisches Trägermedium abgestrahlt wird.<sup>11</sup> Eine Erklärung dieser Phänomene konnte erst am Anfang unseres Jahrhunderts durch Albert Einstein und seine spezielle Relativitätstheorie gegeben werden, in der die Lichtgeschwindigkeit eine zentrale Rolle spielt und sich als Grenzgeschwindigkeit darstellt, die kein materieller Körper je erreichen kann.

Heute ist die Lichtgeschwindigkeit, mit der man synonym auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit aller übrigen elek-

---

<sup>11</sup> Vgl. Gliederungspunkt 4.1.

tromagnetischen Wellen bezeichnet, eine der physikalischen „Fundamentalkonstanten“. Die sogenannten Fundamentalkonstanten treten in den grundlegenden Gesetzen der Physik auf und dienen somit als Maß für die zahlenmäßige Ermittlung der Naturabläufe. Die Fundamentalkonstanten werden durch experimentelle Untersuchungen unter Zugrundelegung eines frei gewählten Maßsystems gewonnen.<sup>12</sup>

Für unsere heutige technische Zivilisation weist die Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante viele praktische Anwendungsfelder auf. Die genaue Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit erlaubt es uns unter anderem,

- das Längennormal (Meter) und abgeleitete Größen mit größter Genauigkeit festzulegen,
- Radarüberwachungen der Luft- und Raumfahrt durchzuführen,
- genaue Landvermessungen durchzuführen,
- Satellitennavigation in der Schifffahrt zu ermöglichen,
- die zeitgenaue Steuerung von Raumsonden über große Entfernungen zu realisieren und
- in der Astronomie die Abstände und Bahnen der Planeten und ihrer Monde mit Radarwellen äußerst genau zu vermessen.

Heute wissen wir, daß die Lichtgeschwindigkeit nicht nur Ausdruck für die bloße Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist, sondern auch eine entscheidende Rolle für die Struktur von Raum und Zeit spielt.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> Vgl. Wesp, Adam: Die Fundamentalkonstanten der Physik, 2. erweiterte Auflage, Leinfelden-Echterdingen 1978, Seite 8.

<sup>13</sup> Vgl. Gliederungspunkt 4.2.