

1. Einleitung

Wasserstoff spielt bei der technischen Anwendung von Halbleitern, der Herstellung von elektronischen Bauelementen, eine wichtige Rolle. Er ist bei deren Produktion in vielen Prozessschritten anwesend, speziell beim vielfachen Ätzen mit wässrigen Lösungen und Säuren. Daher besteht ein essentielles Interesse daran zu wissen, welche Auswirkungen der Wasserstoff im Halbleiter auf dessen Eigenschaften wie zum Beispiel die Leitfähigkeit und deren Temperaturverhalten hat.

Es ist seit einiger Zeit bekannt, dass Wasserstoff, trotz seiner geringen Löslichkeit, im Halbleiter Störstellen passivieren [Pankove 1991, Pearton 1992] oder in bestimmten Temperaturbereichen die Sauerstoffdiffusion durch eine "katalytische Wirkung" stark beschleunigen kann [Murray 1991, Myers 1992]. Dabei sind jedoch die zu Grunde liegenden Prozesse oft noch nicht ganz verstanden, nicht zuletzt auch wegen der Schwierigkeiten, Wasserstoff in sehr geringer Konzentration mit herkömmlichen Methoden wie der Elektronenspinresonanz (ESR) oder der Infrarotabsorption (IR) zu untersuchen. Das Empfindlichkeitsproblem der klassischen Methoden kann aber durch Messungen an protonenbestrahlten Proben mit einer deutlich erhöhten Protonenkonzentration umgangen werden [Bech Nielsen 1997]. Dazu ist jedoch eine hohe Strahlendosis notwendig, welche eine große Strahlenschädigung der Probe mit sich bringt. Durch die damit verbundene hohe Anreicherung mit Wasserstoff kann es aber zu Agglomerationen von Wasserstoff in der Probe kommen. Die durch die Protonenbestrahlung erzeugten Agglomerationen und Strahlenschäden müssen bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen Strahlenschädigung und intrinsischen Probeneigenschaften oft nicht mehr möglich.

Ein Ausweg ergibt sich, wenn man positive Myonen (μ^+) anstelle von Wasserstoff, bzw. Protonen einsetzt. Mit der damit verbundenen Myonenspektroskopie [Patterson 1988, Schenk 1985] befasst sich diese Arbeit. Aufgrund ihrer Eigenschaften, die im Folgenden dargestellt werden, können positive Myonen als hochempfindliche Sonden für lokale Magnetfelder in kondensierter Materie, im vorliegenden Fall Halbleitern, eingesetzt werden. Die positiven Myonen können dabei gleichzeitig als Ersatz für Protonen angesehen werden, da beide Teilchen hinsichtlich aller relevanten Wechselwirkungen mit kondensierter Materie sehr große Ähnlichkeiten aufweisen. Dadurch, dass die Detektion einzelner Myonen und deren Zerfallsprodukte (Positronen) möglich ist, ist die Strahlenschädigung der Probe bei der Verwendung von Myonen viel geringer als im Fall von Protonen und fast immer vernachlässigbar.

Das Myon gehört zur Familie der Leptonen [Lohrmann 1990] und besitzt einen Spin ($\frac{1}{2}$), und damit verbunden ein magnetisches Moment. Zudem ist eine nahezu 100% spinpolarisierte Erzeugung eines Myonenstrahles möglich. Die Myonen zerfallen mit einer mittleren Lebensdauer von $\tau = 2,197 \mu\text{s}$, wobei die

Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Emissionsrichtung des Zerfallspositrons mit der momentanen Spinorientierung des Myons zum Zerfallszeitpunkt korreliert ist. Unter Nutzung dieser Eigenschaften haben sich verschiedene Meßmethoden, Myonenspin-Rotation, -Relaxation und -Resonanz entwickelt, welche alle unter dem Begriff μ SR zusammengefaßt werden. Aus genannten μ SR-Experimenten sind Informationen extrahierbar, welche denen entsprechen, die mit der ESR oder der NMR (Kernspinresonanz, Nuclear Magnetic Resonance) gewonnen werden können. Zum Beispiel Informationen über lokale Magnetfelder, räumliche Magnetfeldverteilungen und zeitliche Fluktuationen magnetischer Wechselwirkungen. Daraus können dann weitere Informationen über die untersuchten Substanzen und das Verhalten von μ^+ in diesen gewonnen werden.

Der Vorteil der μ SR-Techniken ist deren hohe Empfindlichkeit, welche durch den Nachweis einzelner Myonen und deren Zerfallspositronen mit kernphysikalischen Methoden entsteht. Ein auswertbares Signal wird in zeitdifferentiellen μ SR-Experimenten aus 10^6 bis 10^8 nacheinander implantierten Myonen in Form von Zeithistogrammen erhalten. Dabei wird die Zeit zwischen der Myonenimplantation und der Registrierung des Zerfallspositrons gemessen. Weiterhin wird die Emissionsrichtung des Zerfallspositrons mit verschiedenen Detektoren bestimmt. Aus dieser ergibt sich die Orientierung des Myonenspins zum Zeitpunkt des Zerfalls.

Das Myon ist keine passive Sonde, da es wie das Proton einfach positiv geladen ist. Durch die positive Ladung wird das Elektronensystem allerdings in der Umgebung des Myons stark gestört. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist dies aber eine erwünschte Störung, denn sie entspricht ziemlich genau der Störung, die Protonen, d. h. Wasserstoffkerne, im Halbleiter erzeugen. Das Myon kann im Halbleiter, genau wie ein Proton, ein Elektron einfangen und ein wasserstoffähnliches System mit der Bezeichnung Myonium bilden. Da die Masse des Myons ($m_\mu \approx 1/9 m_p \approx 207 m_e$) groß gegenüber der des Elektrons (m_e) ist (m_p ist die Protonenmasse), ergibt sich für das Myonen-Elektronensystem praktisch die gleiche reduzierte Masse wie für das Protonen-Elektronensystem. Damit besitzt Myonium die gleichen elektronischen Eigenschaften wie Wasserstoff. Je nachdem, wie das Myon bzw. Myonium im Halbleiter eingebaut wird, ergeben sich verschiedene Myonenspezies. Die paramagnetischen Spezies besitzen einen ungepaarten Elektronenspin, wohingegen diamagnetische Spezies nur gepaarte Elektronenspins aufweisen.

Stellvertretend für die klassischen Element-Halbleiter beschränkt sich diese Arbeit auf Silizium. In Silizium existieren zwei paramagnetische Hauptmyonenspezies, Mu_T und Mu_{BC} . Mu_T befindet sich im Si-Kristall auf einem Tetraederplatz und besitzt eine große isotrope Hyperfeinwechselwirkung, während sich Mu_{BC} in der Mitte einer Si-Si-Bindung (Bond Center) befindet und eine deutlich kleinere und stark anisotrope Hyperfeinwechselwirkung zeigt [Patterson 1988, Schenk 1985]. Hinter der diamagnetischen Myonenspezies μ^d können ganz verschiedene Konfigurationen stecken, da diese durch die gepaarten Elektronen-

spins praktisch identische Signale liefern. So kann zum Beispiel eine Bindung von Myonium an eine Störstelle mit Absättigung des ungepaarten Elektrons zu einem diamagnetischen Myonium-Störstellen-Komplex führen. Auch eine Änderung des Ladungszustandes von Myonium (Mu_T^- , Mu_{BC}^+ , etc.), unter Umständen verbunden mit einem Platzwechsel, führt zu einer diamagnetischen Myonenspezies. Es wurden noch zwei weitere paramagnetische Spezies in Silizium gefunden (Mu_V , Mu_{OX}) [Schefzik 2000a, Schefzik 2000b], welche aber nur unter ganz spezifisch gewählten Bedingungen in Erscheinung treten und in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet werden.

Trotz einer Vielzahl von μSR -Untersuchungen, die dem Studium verschiedener Einflüsse wie z. B. Temperatur, Dotierung, Beleuchtung und Strahlenschädigung auf das statische und dynamische Verhalten (z. B. Umwandlungsreaktionen, Locheinfang, etc.) der verschiedenen Myonenspezies in Silizium gewidmet waren [Major 1992, Iwanowski 1993, Kreitzman 1995, Scheuermann 1997], ist noch vieles unverstanden oder nicht abschließend geklärt. Ein Grund ist ein Defizit in der am häufigsten eingesetzten μSR -Technik, der Transversalfeld-Myonen-Spin-Rotation ($\text{TF}\mu\text{SR}$). Bei der $\text{TF}\mu\text{SR}$ wird ein Magnetfeld transversal zur wohldefinierten Orientierung der Myonenspins zum Zeitpunkt der Implantation angelegt. Die Myonenspins präzedieren dann unter dem Einfluss des angelegten Magnetfeldes und innerer Magnetfelder, erzeugt z. B. durch die Hyperfeinwechselwirkung. Das gesamte Präzessionssignal im Histogramm entsteht durch die Summation über die Beiträge von verschiedenen nacheinander implantierten Myonen. Eine Voraussetzung für die Detektion eines Signales ist jedoch, dass die Spinphasenkohärenz nicht zu stark gestört ist. D. h. die Myonenspinorientierung für verschiedene nacheinander implantierte Myonen muss sich im gleichen Zeitraum (ab der Implantation gemessen) um etwa den gleichen Winkel drehen. Mögliche Gründe für einen Verlust der Spinphasenkohärenz sind räumliche Verteilungen der inneren lokalen Magnetfelder, zeitliche Fluktuationen lokaler Magnetfelder, oder stochastische Umwandlungen zwischen Spezies mit unterschiedlichen Hyperfeinwechselwirkungen. Der Verlust der Spinphasenkohärenz kann dazu führen, dass ein beträchtlicher Anteil der implantierten Myonen nicht zum Signal beiträgt, was zu einer sogenannten "missing fraction" führt.

In eigenleitendem (intrinsischem) Silizium $\text{Si}(i)$ -FZ (FZ = hergestellt nach dem Zonenschmelzverfahren, Float Zone) tragen bei Temperaturen unter 100 K nahezu 100% der implantierten Myonen zum $\text{TF}\mu\text{SR}$ -Signal bei, wobei die Anteile von Mu_T und Mu_{BC} jeweils bei etwa 50% liegen und der Anteil von μ^d 2% bis 5% beträgt. In mit Phosphor (P) oder Bor (B) dotierten Siliziumkristallen $\text{Si}(P)$ -FZ, $\text{Si}(B)$ -FZ (P/B-Konzentration $\approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) bei einer Temperatur unter 30 K sind hingegen nur Mu_{BC} und μ^d mit annähernd gleich großen Anteilen wie in $\text{Si}(i)$ -FZ beobachtbar, wohingegen Mu_T in keiner der beiden dotierten Proben mit der $\text{TF}\mu\text{SR}$ nachgewiesen wird. Daher tragen hier fast 50% der implantierten Myonen nicht zum Signal bei. Es stellt sich die Frage, was mit

dem nicht beobachteten Mu_T in den dotierten Proben passiert. Eine plausible Antwort wurde durch [Kreitzman 1990, Major 1992, Scheuermann 1997] mit Hilfe der Hochfrequenz-Myonen-Spin-Resonanz ($\text{HF}\mu\text{SR}$) durch Messungen an der diamagnetischen Spezies μ^d gefunden.

Bei der $\text{HF}\mu\text{SR}$ wird neben einem statischen Magnetfeld, longitudinal zur Myonenspinrichtung zum Zeitpunkt der Implantation, ein hochfrequentes Wechselfeld senkrecht dazu angelegt. Bei geeigneter Frequenz des Hochfrequenzfeldes werden Übergänge zwischen den unterschiedlichen Zuständen der Myoniumspezies angeregt, sodass auf diese Weise genau eine spezielle Spezies (für die die Übergangsbedingung erfüllt ist) selektiv untersucht werden kann. Dabei können $\text{HF}\mu\text{SR}$ -Experimente so durchgeführt werden, dass man auf eine Spinphasenkohärenz nicht angewiesen ist.

Die $\text{HF}\mu\text{SR}$ Messungen an Si(P)-FZ und Si(B)-FZ ergaben bei tiefen Temperaturen ($< 30 \text{ K}$) einen großen μ^d -Anteil von ungefähr 20% bei Si(P)-FZ und etwa 40% bei Si(B)-FZ , obwohl in den $\text{TF}\mu\text{SR}$ -Messungen nur ein wesentlich geringerer Anteil von etwa 5% beobachtet wurde [Scheuermann 1997]. Die Dotierungsabhängigkeit des mit der $\text{HF}\mu\text{SR}$ gefundenen μ^d -Signals wurde zuvor bei Dotieratomkonzentrationen von 10^{12} cm^{-3} bis 10^{16} cm^{-3} untersucht [Kreitzman 1995]. Mit wachsender Dotieratom-Konzentration wuchs das bei $\text{HF}\mu\text{SR}$ -Messungen beobachtete μ^d -Signal auf etwa 40% μ^d -Anteil an, der in $\text{TF}\mu\text{SR}$ -Messungen sichtbare μ^d -Anteil blieb aber bei unter 5%. Daraus ergab sich die Deutung, dass Mu_T in den $\text{TF}\mu\text{SR}$ -Experimenten nicht beobachtet werden kann, weil es relativ schnell und im Wesentlichen irreversibel von den Dotieratomen eingefangen wird und mit diesen einen diamagnetischen Myonium-Dotieratom-Komplex ($\text{Mu}_T\text{-P}$, $\text{Mu}_T\text{-B}$) bildet. Der in $\text{TF}\mu\text{SR}$ -Messungen erkennbare μ^d -Anteil ist damit sehr klein, da der Einfang von Mu_T an den Dotieratomen stochastisch erfolgt und die Spinphasenkohärenz des präzedierenden μ^d -Spinensembles weitgehend zerstört wird.

Ein weiteres Beispiel für die Leistungsfähigkeit der $\text{HF}\mu\text{SR}$ ist die Beobachtung des Einflusses von Sauerstoff auf die Bildung der verschiedenen Myonenspezies. Si -Proben, die nach dem Czochralski-Verfahren (CZ) hergestellt werden, besitzen typischerweise einen um den Faktor 10^2 bis 10^3 höheren Gehalt an interstitiellem Sauerstoff als FZ Proben. Untersuchungen ergaben, dass die Anwesenheit von Wasserstoff in bestimmten Temperaturbereichen die Sauerstoffdiffusion durch eine "katalytische Wirkung" stark beschleunigen kann [Murray 1991, Myers 1992]. Demnach sollte sich ein Einfluss von Sauerstoff auf die Bildung der verschiedenen Myonenspezies nachweisen lassen. Doch in der $\text{TF}\mu\text{SR}$ wird kein Unterschied zwischen Si(P)-FZ und Si(P)-CZ festgestellt. In beiden Proben werden mit der $\text{TF}\mu\text{SR}$ ein ca. gleich großes Mu_{BC} -Signal, wenig μ^d und eine große missing fraction festgestellt. Im Gegensatz dazu wurde mit Hilfe der $\text{HF}\mu\text{SR}$ in Si(P)-CZ bei tiefen Temperaturen ($< 50 \text{ K}$) nur ein geringer Anteil an μ^d gefunden ($< 5\%$), in Si(P)-FZ aber ein μ^d -Anteil von etwa 30% [Scheuermann 1997]. Oberhalb von 50 K liefern beide Proben praktisch

gleiche Ergebnisse. Die HF μ SR unterscheidet damit im Gegensatz zur TF μ SR nicht nur Dotierungseinflüsse, sondern auch noch CZ- und FZ-Proben, die sich nur im Sauerstoffgehalt unterscheiden. Die im Tieftemperaturbereich in den HF μ SR-Messungen beobachteten Unterschiede zwischen den FZ- und CZ-Proben lassen vermuten, dass Mu_T in Si(P)-CZ bei Temperaturen unter 50 K an Sauerstoffstörstellen eingefangen wird. Dies führt nach dieser Deutung zu einer Unterdrückung der Bildung des diamagnetischen Komplexes $\text{Mu}_T\text{-P}$, der in Si(P)-FZ gebildet wird. Oberhalb von 50 K ist die Sauerstoffhaftstelle offenbar nicht stark genug, um ein thermisch aktiviertes Entweichen von Mu_T und eine damit verbundene Bildung des Myonium-Dotieratom-Komplexes zu verhindern.

In beiden genannten und einer Vielzahl von weiteren Beispielen wurde aus technischen Gründen mit der HF μ SR nur die diamagnetische Spezies μ^d untersucht. Trotzdem waren, wenn man TF μ SR-Daten und HF μ SR-Daten an μ^d zusammennahm, fundierte Vermutungen über Umwandlungsprozesse bzw. Einfangreaktionen der verschiedenen Myonenspezies in Silizium möglich. Allerdings gab es in den genannten Beispielen keine Evidenz, dass Mu_T in dotierten Si-Proben nach der Implantation tatsächlich gebildet wird und anschließend durch einen einmaligen Einfangprozess in diamagnetisches μ^d "umgewandelt" wird. Um weitere Informationen zum Test der Vermutungen über die Umwandlungsreaktionen der Myonenspezies zu erhalten, wäre es wünschenswert, neben μ^d auch Mu_T und Mu_{BC} an unterschiedlich dotierten Si-Proben (eigenleitend (intrinsisch), phosphor-, bor-dotiert) systematisch mit der HF μ SR unter Berücksichtigung des Sauerstoffgehaltes (FZ, CZ) bei verschiedenen Temperaturen zu untersuchen. Daraus ergab sich ein Ziel dieser Arbeit. Die Vermessung von Si(i)-FZ/CZ, Si(B)-FZ/CZ und Si(P)-FZ/CZ, wobei nicht nur die μ^d -, sondern parallel auch die Mu_T und Mu_{BC} -Signale mit der HF μ SR studiert werden sollten. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Vergleich von FZ- und CZ-Proben. Da CZ-Proben selbst mit der TF μ SR bisher kaum studiert wurden, sollten zudem auch systematische TF μ SR-Messungen an den CZ-Proben durchgeführt werden um insgesamt ein vollständiges Bild bezüglich der drei Myonenspezies Mu_T , Mu_{BC} und μ^d mit TF μ SR und HF μ SR bei verschiedenen Dotierungen und unterschiedlichem Sauerstoffgehalt zu erhalten.

Die HF μ SR hat zwar eine lange Geschichte, wurde aber in der Vergangenheit als zu schwierig für Routineuntersuchungen angesehen. Bereits 1957, kurz nach der Voraussage der Paritätsverletzung des Myons durch Lee und Yang [Lee 1956], wurde die HF μ SR erstmals von Coffin [Coffin 1958] an der diamagnetischen Spezies zur Bestimmung des gyromagnetischen Verhältnisses des Myons angewandt. Danach geriet diese Methode in Vergessenheit und wurde erst wieder im Jahre 1981 von Kitaoka [Kitaoka 1982] wiederentdeckt, wobei erste Untersuchungen an Wasser, Aluminium und Graphit durchgeführt wurden. 1990 wurden von Kreitzman dann erste HF μ SR-Untersuchungen an der diamagnetischen Spezies in unterschiedlich dotiertem Silizium durchgeführt [Kreitzman 1990]. Diese Untersuchungen wurden ab 1992 durch die Studien des

Einflusses von Dotierung und photogenerierten Ladungsträgern (Lichteinstrahlung) auf die diamagnetische Spezies von Major und Mitarbeitern [Major 1992, Iwanowski 1993, Scheuermann 1997] ergänzt. Zeitgleich wurden 1992 von Major erstmals Messungen an den beiden paramagnetischen Spezies μ_T und μ_{BC} in Halbleitern durchgeführt. Die Messungen an den paramagnetischen Myonenspezies wiederum wurden 1995 von Kreitzman verfeinert [Kreitzman 1995], blieben jedoch auf wenige Messungen begrenzt, sodass sich die HF μ SR hauptsächlich auf das Studium von μ^d beschränkte.

Schwerpunkt der Arbeit war es ein HF μ SR-Spektrometer aufzubauen, das erstens an dem quasikontinuierlichen Myonenstrahl (kontinuierlich statistischer Teilchenstrahl) des Paul Scherrer Instituts (PSI, Schweiz) [PSI 1994] betrieben werden konnte und zweitens für den Routinebetrieb geeignet war. Hierzu konnte auf Erfahrungen am Max-Planck-Institut für Metallforschung mit einer HF μ SR-Apparatur für den gepulsten Strahl des Rutherford Appleton Laboratory (RAL, Großbritannien) [RAL 1992] zurückgegriffen werden. Vorgabe war es, eine bestehende software-gestützte Messelektronik zu nutzen, die von der Stuttgarter Myonengruppe aufgebaut worden war [Schmidl 1997] und für Messungen mit verschiedenen μ SR-Techniken, nicht aber der HF μ SR eingesetzt wurde, auf eben diese HF μ SR-Anwendungen zu erweitern. Aufgrund des neuartigen Datenerfassungssystemes ist eine unkomplizierte Datenerfassung, eine software-technische Selektion und eine einfache Steuerung des Spektrometers wie z. B. Magnetfeld- und Temperatureinstellung möglich. Dieses System mußte zur Steuerung und Überwachung der eingestrahlten Hochfrequenz-Wechselfelder ausgebaut werden. Die eingestrahlte Hochfrequenz sollte dann direkt über den PC eingestellt werden (Frequenz, Amplitude), während eine Überwachungseinheit den routinemäßigen Betrieb ermöglichen sollte. Die auf einem PC basierende Meßelektronik bietet damit die notwendige Flexibilität um HF μ SR-Experimente auch am quasikontinuierlichen Strahl des PSI zu realisieren. Damit sollten insbesondere zeitdifferentielle HF μ SR-Messungen der drei Myonenspezies μ^d , μ_T und μ_{BC} ermöglicht werden, die an einem gepulsten Strahl aufgrund der Pulsstruktur nur beschränkt durchführbar sind.

Neben dem Ausbau der Datenerfassungsanlage ist auch die Konstruktion eines geeigneten Probenkopfes, der vielen unterschiedlichen Faktoren wie z. B. Überschlagsfestigkeit, Tieftemperaturbeständigkeit, mechanische Stabilität, etc. genügen muss, notwendig. Dabei sollen über eine Weiterentwicklung der Hochfrequenzspule im Probenkopf höhere HF-Feldstärken mit einer deutlich verbesserten Homogenität erreicht werden. Die bessere Homogenität ist deshalb unerlässlich, da das Signal ansonsten durch eine Überlagerung unterschiedlicher Präzessionsfrequenzen von unterschiedlichen Orten innerhalb der Probe mit einer zusätzlichen Dämpfung abgeschwächt wird. Die höhere Feldstärke dagegen soll die Absättigung der Übergänge gewährleisten, wodurch in erster Linie eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen erreicht, nebenbei aber auch eine verbesserte zeitdifferentielle Auswertung ermöglicht wird.

2. Grundlagen der Myonenspektroskopie

2.1. Myonen

Das negative Myon ist ein Elementarteilchen und gehört wie das Elektron (e^-) zur Teilchenfamilie der Leptonen [Lohrmann 1990]. Es besitzt die gleiche Ladung wie das Elektron, jedoch eine um ca. 207 mal größere Masse und wird daher auch als "schweres Elektron" bezeichnet. Neben dem negativen Myon (μ^-) gibt es wie beim Elektron auch dessen Antiteilchen, das positive Myon (μ^+), vergleichbar dem Positron (e^+), dem Antiteilchen des Elektrons. Im Rahmen dieser Arbeit ist es möglich, sich von nun an im Falle der Myonen, wenn nicht explizit anders erwähnt, ausschließlich auf positive Myonen zu beschränken. Eine Übersicht über die Eigenschaften des positiven Myons ist in der Tabelle 2.1 gegeben.

Eigenschaften des positiven Myons μ^+	
Ruhemasse	$m_\mu = 105,66 \text{ MeV}/c^2 \approx (1/9) m_p \approx 207 m_e$
Ladung	$q = +e$
Spin	$S_\mu = (1/2)\hbar$
Magnetisches Moment	$\mu_\mu = 4,4905 \cdot 10^{-26} \text{ J/T} \approx (1/207) \mu_B$
Gyromagnetisches Verhältnis	$\gamma_\mu = 8,516 \cdot 10^8 \text{ rad/Ts} \approx 2\pi \cdot 135,5 \text{ MHz/T}$
Mittlere Lebensdauer	$\tau_\mu = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Tab. 2.1: Eigenschaften des positiven Myons μ^+ . m_p ist die Masse des Protons, m_e die des Elektrons. μ_B ist das Bohrsche Magneton, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und e die Elementarladung. h stellt die Plancksche Konstante dar und $\hbar = h/(2\pi)$.