Autor: T. Döbbecke
Datum: 02/2012

Gibt es Überlichtgeschwindigkeiten als Signal- und Teilchengeschwindigkeiten?

Wir wenden uns in diesem Beitrag einer grundsätzlichen und oft diskutierten Frage, der Frage nach der Existenz von Überlichtgeschwindigkeiten zu.
In letzter Zeit hat diese Fragestellung im Zusammenhang mit Neutrinoexperimenten erneut Aktualität erlangt. Man hat aber auch schon zuvor bei verschiedenen quantenphysikalischen Experimenten (im Zusammenhang mit dem Tunneleffekt) Überlichtgeschwindigkeiten als Gruppengeschwindigkeiten gemessen.
Ist dadurch das Kausalitätsprinzip (Die Ursache geht der Wirkung zeitlich voraus) verletzt oder gibt es tatsächlich Bereiche, worin die Relativitätstheorie nicht mehr gültig ist? Vielleicht handelt es sich lediglich um Messfehler, welche sich akkumulieren? Dies sind häufig gestellte Fragen, welche wir im Folgenden zu beantworten versuchen. Im Zusammenhang mit der Frage nach Überlichtgeschwindigkeiten gehen wir auch auf die Bestimmung von Konstanten, auf Bedingungen im Raum, auf Quanteneffekte, Grenzbereiche, Eigenschaften von Teilchen und Feldern und auf Wechselwirkungen ein.

1 Welche Arten von Überlichtgeschwindigkeiten suchen wir?

Wenn wir die Frage nach Überlichtgeschwindigkeiten allgemein stellen, so können wir sofort mit Sicherheit sagen, dass es Überlichtgeschwindigkeiten gibt. Warum? Es gibt z.B. Teilchen, welche in einem Medium eine höhere Geschwindigkeit erreichen können, als die Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium (Tscherenkow-Effekt).
Dringt ein energiereiches und elektrisch geladenes Teilchen mit der Geschwindigkeit $v > c_M$ in ein Medium ein, in dem die Phasengeschwindigkeit des Lichtes $c_M = \frac{c}{n}$ (*n= Brechzahl*) beträgt, so tritt die Tscherenkow-Strahlung auf. Der Winkel zwischen der Flugrichtung des Teilchens und des Tscherenkow-Lichtes hängt vom Verhältnis der Geschwindigkeit des Lichtes im Medium zur Geschwindigkeit des Teilchens ab.
Also fragen wir jetzt präziser: Gibt es Geschwindigkeiten, welche größer als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum mit $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ sind? Aber auch auf diese Frage können wir sofort mit Sicherheit antworten, dass es solche Geschwindigkeiten gibt, denn es sind z.B. Überlichtgeschwindigkeiten in der Kosmologie als Expansionsgeschwindigkeiten von Galaxien (offenes Weltmodell) und Überlichtgeschwindigkeiten als Phasengeschwindigkeiten von elektromagnetischen Wellen bekannt (bei normaler Dispersion).
Bei normaler Dispersion nimmt mit Zunahme der Wellenlänge die Phasengeschwindigkeit zu, die Brechzahl nimmt dabei ab. Die Phasengeschwindigkeit kann dann größer als die Gruppengeschwindigkeit werden. In Medien, in denen die Brechzahl für manche Wellenlängen kleiner als eins wird, sind dann Überlichtgeschwindigkeiten möglich.

Es geht also nicht um die Frage nach Überlichtgeschwindigkeiten schlechthin, davon sind bereits diverse Arten bekannt, sondern um die Frage, ob es Überlichtgeschwindigkeiten als Signal- Gruppen- und Teilchengeschwindigkeiten gibt.

2 Muss eine Kausalitätsverletzung bei Vorhandensein von Überlichtgeschwindigkeiten auftreten?

Es wurde z.B. mit einem optischen Interferenzversuch, dem Michelson-Versuch, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (unter den gegebenen Bedingungen) nachgewiesen. Es ergab sich, dass sich die Geschwindigkeit der Erde nicht zur Lichtgeschwindigkeit addierte, die Lichtgeschwindigkeit musste eine obere Grenzgeschwindigkeit darstellen.
Mit diesem Versuch wurde gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit in und entgegengesetzt zur Umlaufbewegung der Erde um die Sonne, sowie rechtwinklig dazu, immer gleich bleibt. Einen (ruhenden als auch einen mitbewegten) Äther, (den man zu früheren Zeiten für die Erklärung der Lichtausbreitung annahm) der die Geschwindigkeit des Lichtes beeinflusste, konnte es damit nicht geben.
Überlichtgeschwindigkeiten als Signal- oder Teilchengeschwindigkeiten sind nach der Relativitätstheorie nicht möglich. Photonen im Vakuum besitzen bereits die Grenzgeschwindigkeit und ein Objekt mit Unterlichtgeschwindigkeit kann nicht auf Lichtgeschwindigkeit (und darüber hinaus) beschleunigt werden. Aus der speziellen Relativitätstheorie folgt damit ein nichtlineares Gesetz für die Addition von Geschwindigkeiten und dies hat auch noch weitere Konsequenzen (relativistische Zeit- und Längenveränderungen, relativistische Massezunahme).
Ein Beispiel für die Anwendung dieses Additionstheorems ist der Fizeausche Mitführungsversuch. Hierbei addiert sich die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums zur Lichtgeschwindigkeit im ruhenden Medium. Die Lichtgeschwindigkeit wird dann entsprechend verändert, was von der Art des Mediums, seiner Strömungsgeschwindigkeit und seiner Strömungsrichtung (zur Lichtrichtung) abhängt. Der dabei auftretende Mitführungskoeffizient erklärt sich aus der relativistischen Addition der Geschwindigkeiten. Es gibt danach also doch eine Beeinflussung der Lichtgeschwindigkeit durch ein Medium, aber nicht in dem Sinne, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum überschritten wird.
Der Grenzcharakter der Lichtgeschwindigkeit hat Konsequenzen für die gesamte Physik und wird damit als ein grundlegendes Postulat der Relativitätstheorie betrachtet. In der speziellen Relativitätstheorie wird ausgesagt, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant und unabhängig vom Bewegungszustand der Quelle ist. Eine Überlichtgeschwindigkeit als Signal- oder Teilchengeschwindigkeit würde außerdem dem Kausalitätsprinzip widersprechen.
Tatsächlich wäre dies der Fall, wenn wir eine Überlichtgeschwindigkeit in einem Raum betrachten, worin die Grenzgeschwindigkeit lediglich durch die Lichtgeschwindigkeit bestimmt wird. Man würde dann eine Zeitumkehr und imaginäre Massen folgern, was natürlich ausgeschlossen ist.
Wären aber unter bestimmten Bedingungen und Voraussetzungen (im angenommenen Falle von Überlichtgeschwindigkeiten als Teilchengeschwindigkeiten) auch höhere Grenzgeschwindigkeiten möglich, so tritt eine Verletzung der Kausalität nicht auf, denn in diesem Fall wäre diese höhere Grenzgeschwindigkeit maßgebend. Das bedeutet, das Teilchen

könnte dann größere Geschwindigkeiten als die Lichtgeschwindigkeit besitzen, aber es kann dann nicht diese höhere Grenzgeschwindigkeit überschreiten. Die Lichtgeschwindigkeit bleibt dabei trotzdem als eine mögliche Grenzgeschwindigkeit bestehen. Das man tatsächlich noch weitere Grenzgeschwindigkeiten folgern kann, werden wir später erörtern.

3 Spezielle Fragestellungen im Zusammenhang mit Geschwindigkeitsbetrachtungen

Wir werden uns fragen, wie wir in dem einen oder anderen Fall die Geschwindigkeit zu ermitteln haben, wie genau wir sie bestimmen müssen und von welchem Bezugssystem die Bestimmung einer Geschwindigkeit erfolgt. Wir fassen einige Problemstellungen zusammen.

1.) Man muss von Fall zu Fall untersuchen, ob man klassisch (nichtrelativistisch) rechnen darf, wenn die Geschwindigkeit klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit ist. Hier geht es also um Genauigkeitsfragen.

2.) Geschwindigkeiten sind relativ, man muss also ein Bezugssystem angeben. Insbesondere sind bei hohen Geschwindigkeiten Zeit- und Maßstabsveränderungen zu beachten, welche mit dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten zusammenhängen.

3.) Es ist zu untersuchen, ob wir für den betreffenden Fall die Geschwindigkeiten als unabhängig voneinander betrachten können oder nicht. Hier geht es also um die Frage, welche Geschwindigkeiten wir in unsere Betrachtungen einbeziehen müssen und welche nicht. Hier geht es also auch um die Frage der Beeinflussung einer Geschwindigkeit durch andere Geschwindigkeiten.

4.) Welche Betrachtungen lassen Überlichtgeschwindigkeiten zu, ohne dass diese Geschwindigkeiten Ausbreitungs- oder Signalgeschwindigkeiten sein müssen?

Wir können uns auch fragen, worauf sich die Grenzgeschwindigkeit bezieht. Wir kennen (allgemein ausgedrückt) bestimmte (relativ abgegrenzte) endliche Systeme des Mikro- und des Makrokosmos. Offenbar werden durch die Bedingungen in dem jeweiligen System Grenzen festgesetzt, mithin auch die Grenzgeschwindigkeit, wobei bisher nur die Lichtgeschwindigkeit in Frage kommt.

4 Wie verändert sich die Lichtgeschwindigkeit im Gravitationsfeld?

Es ist wichtig zu erkennen, dass die Lichtgeschwindigkeit von den Bedingungen im Raum abhängt. So wird die Lichtgeschwindigkeit durch das Medium, durch welches das Licht hindurchgeht (Art des Mediums und seine Strömungsgeschwindigkeit) und durch Felder (insbesondere durch das Gravitationsfeld) beeinflusst. Auch im Vakuum sind bestimmte elektromagnetische Eigenschaften von Bedeutung, welche die Grenzgeschwindigkeit bestimmen, was sich am Vorhandensein einer elektrischen und einer magnetischen Feldkonstanten zeigt.
Ein Lichtstrahl sei nun dem Gravitationsfeld eines Himmelskörpers ausgesetzt. Neben einer gravitativen Frequenzverschiebung (Rot- oder Blauverschiebung, je nach Entfernung des Lichtes von der Masse oder der Annäherung des Lichtes an die Masse) und einer

Lichtkrümmung im Gravitationsfeld tritt auch eine Änderung der Lichtgeschwindigkeit auf, welche sich auch im Zusammenhang mit der Lichtkrümmung betrachten lässt.
(Der von der Masse weiter entfernte Anteil der Wellenfront der Lichtwelle muss bei einer Lichtkrümmung in derselben Zeit einen größeren Weg zurücklegen, als der Teil der Wellenfront, welcher näher an der Masse vorbeigeht. Mit der Entfernung des Lichtes von der Masse nimmt also die Lichtgeschwindigkeit zu, wobei aber die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nicht überschritten wird)
Die Lichtgeschwindigkeit (man beziehe sich bei der Messung auf die Koordinatenzeit) ist danach abhängig von der Masse des Himmelskörpers, vom Abstand der Lichtwelle von dem Himmelskörper, von Drehimpuls und Ladung des Himmelskörpers und von der Richtung des Lichtes zur Richtung des Gravitationsfeldes. In Gravitationsfeldrichtung ist dabei die Lichtgeschwindigkeit geringer als rechtwinklig dazu. Diese Resultate ergeben sich aus den entsprechenden Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen für das Gravitationsfeld [2].
Vergrößert sich die Massedichte und wird der Abstand des Lichtes zur Masse geringer, so wird aufgrund des stärkeren Gravitationsfeldes (größere Krümmung der 4-dimensionalen Raum-Zeit) und der stärkeren Wechselwirkungen dieses Feldes mit den Lichtquanten die Lichtgeschwindigkeit geringer. Eine Vergrößerung von Drehimpuls und Ladung eines Himmelskörpers führt zu einer Abschwächung der masseabhängigen allgemein-relativistischen Effekte (z.B. der allgemein relativistischen Zeitverschiebung) und zu einer Veränderung der Lichtgeschwindigkeit [2] (wirkt der masseabhängigen Lichtgeschwindigkeitsverringerung entgegen). Betrachtet man die Lichtausbreitung bei Beschleunigung (z.B. Lichtausbreitung innerhalb eines Kastens, welcher gleichmäßig beschleunigt wird und ohne Gravitationsfeld vom Standpunkt eines ruhenden Außenbeobachters), dann treten wegen des Äquivalenzprinzips zwischen Trägheit und Schwere analoge relativistische Effekte auf.

5 Überlichtgeschwindigkeiten, Grenzgeschwindigkeiten und Bedingungen im Raum

Wir wollen auf die Tatsache, dass die Grenzgeschwindigkeit durch die Bedingungen im Raum bestimmt wird, noch etwas näher eingehen.
Die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit stellt zunächst erst einmal eine Grenzgeschwindigkeit dar, wie z.B. auch das nichtlineare Additionstheorem der Geschwindigkeiten in der Relativitätstheorie beweist. Das heißt aber nicht, dass unter ganz anderen physikalischen Bedingungen des Raumes bzw. bei anderen Teilchen und Effekten, andere (z.B. höhere) Grenzgeschwindigkeiten nicht möglich wären. Hierbei beachte man zwei Tatsachen.

1.) Es gibt keinen absolut leeren Raum:

Das Vakuum ist von fluktuierenden elektromagnetischen und anderen Quantenfeldern und von virtuellen Teilchen und Antiteilchen (es spielen sich spontane Paarentstehungs- und Vernichtungsprozesse ab) erfüllt (Nachweis durch: Lamb-Shift, Casimir-Effekt). Hierdurch werden offenbar gewisse Bedingungen im Vakuum festgelegt. Der „leere“ Raum bekommt damit bestimmte elektrische und magnetische Eigenschaften, die durch das Vorhandensein einer Permeabilitäts- und einer Dielektrizitätskonstante (im Vakuum) charakterisiert sind. Es lässt sich auch eine Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit über die Dielektrizitätskonstante,

dem Verhältnis der magnetischen Momente für das Elektron und einem Widerstandsnormal ableiten[2].
Auch die dunkle Materie (die mit einem noch unbekannten skalaren Feld zusammenhängen kann) und die Gravitationswirkung der kosmischen Massen bestimmen gewisse globale Bedingungen des physikalischen Raumes. Desweiteren ist der Kosmos von einem Strahlungshintergrund (3k-Hintergrundstrahlung) erfüllt und Neutrinos und weitere Teilchen und Felder durchfluten den Raum.

2.) Überlichtgeschwindigkeiten brauchen nicht im Widerspruch zum Kausalitätsprinzip und zur Relativitätstheorie zu stehen:

Wären nämlich die Bedingungen im Raum (an gewissen Orten oder zu bestimmten Zeiten) so, dass Veränderungen der obengenannten elektromagnetischen Kenngrößen usw. auftreten, so wäre es möglich, dass eine höhere Grenzgeschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Raum existiert, was dann natürlich mit Überlichtgeschwindigkeiten verbunden wäre. Dies wäre dann aber kein Widerspruch zur Relativitätstheorie, zur Maxwell-Theorie oder zum Kausalitätsprinzip, weil diese höhere Grenzgeschwindigkeit, dann nur unter diesen veränderten Bedingungen auftritt, aber unter unseren gewohnten Bedingungen, wäre dann weiter die Lichtgeschwindigkeit die obere Grenzgeschwindigkeit. Man kann sich dann also mehrere Räume mit unterschiedlichen Eigenschaften (Bedingungen) vorstellen, wobei unterschiedliche Grenzgeschwindigkeiten auftreten. Wir führen nun noch einige allgemeine Betrachtungen an: Photonen im Vakuum besitzen bereits die Grenzgeschwindigkeit. Teilchen, welche die (obere) Grenzgeschwindigkeit bereits besitzen, können nur abgebremst werden, wobei die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium oder in einem stärkeren Gravitationsfeld geringer wird. In Abhängigkeit von der Art des Teilchens (oder des Quants) und in Abhängigkeit von den physikalischen Voraussetzungen und Bedingungen wird also ein Teilchen unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen. Ist dabei die Geschwindigkeit höher als die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, so muss mit den gegebenen neuen Bedingungen eine weitere Grenzgeschwindigkeit bestimmt sein, welche nun für dieses Teilchen maßgebend ist.

6 *Überlichtgeschwindigkeiten als Signal- und Gruppengeschwindigkeiten und der Tunneleffekt*

Experimentelle Hinweise auf Überlichtgeschwindigkeiten als Signal- oder Gruppengeschwindigkeiten lieferten z.B. die Tunnelexperimente von G.Nimtz. Hierbei konnten Mikrowellenimpulse mit Überlichtgeschwindigkeit durch einen verengten Hohlleiter übertragen werden. Ursache für die Übertragung einer Wellengruppe mit Überlichtgeschwindigkeit ist hierbei der Tunneleffekt in Verbindung mit einem nichtlokalen Verhalten der Wellengruppe und in anderen Tunnelexperimenten kommt als eine Ursache die sogenannte frustrierte Totalreflexion in Frage. Es spielen hierbei also lediglich Effekte der Quantentheorie (nicht der Relativitätstheorie) eine Rolle. Es gäbe danach Bereiche (Einstein untersuchte den Tunneleffekt nicht), worin die Relativitätstheorie nicht mehr gilt. Im Zusammenhang mit diesen Tunnelexperimenten sind immer wieder mögliche Messfehler, die Art und Weise der Messung usw. diskutiert worden, doch sind bei vielen Tunnelexperimenten verschiedener Art immer wieder Überlichtgeschwindigkeiten gemessen worden. Wir wollen einige Beispiele anführen.
Normalerweise kann ein Teilchen oder ein Signal eine bestimmte Barriere (Tunnelstrecke, Potenzialbarriere) nicht überwinden, da seine Energie dafür nicht ausreicht. Es gibt aber

Teilchen, die trotzdem (mit einer geringen Wahrscheinlichkeit) die Barriere überwinden können (Tunneleffekt). Als eine Ursache für den Tunneleffekt wird die Unschärferelation zwischen Energie und Zeit herangezogen, welche objektiv im Quantenbereich gilt und die nicht nur im Zusammenhang mit dem Messprozess zu sehen ist (und welche auch mit der Unschärferelation zwischen Ort und Impuls zusammenhängt). Danach kann ein Teilchen kurzzeitig einen Energieschub bekommen, der zum Überwinden der Barriere ausreicht.
Beim Tunneleffekt kommt als Photonische Barriere z.B. ein Doppelprisma in Frage (Luftspalt zwischen zwei eng benachbarten Prismen), wobei eine frustrierte Totalreflexion auftritt, oder ein photonisches Gitter, wobei destruktive Interferenz auftritt, oder auch ein unterdimensionierter Hohlleiter.
Bei der frustrierten Totalreflexion (nicht vollständigen Reflexion) am Doppelprisma breitet sich die Lichtwelle als Oberflächenwelle auf dem einen Prisma aus, wobei diese Welle in eine parallele und eine senkrechte Komponente zerfällt. Die Lichtwelle tunnelt dann in das zweite Prisma (nach den Ergebnissen von G. Nimtz benötigt dabei die senkrechte Komponente keine Zeit). Die frustrierte Totalreflexion stellt heute eine wertvolle Hilfe bei der Bestimmung von Molekülgrößen in der Chemie, bei Messungen mit dem Tunnelmikroskop, für den Nachweis bestimmter biologisch relevanter Moleküle oder in der Optoelektronik bei der teilweisen Signalübertragung von einer Glasfaserleitung in eine andere dar. Bestimmte Halbleiterbauelemente funktionieren nach dem Prinzip des $\lambda/4$ -Gitters und in der Hochfrequenztechnik kommen Hohlleiter zum Einsatz. Bei der Signalübertragung über diese verschiedenen Tunnelbarrieren sind nun Überlichtgeschwindigkeiten gemessen worden. In einem verengten Hohlleiter beispielsweise benötigt ein Mikrowellenimpuls der Trägerfrequenz $8{,}7GHz$ für eine $10cm$ lange Tunnelstrecke nur $130ps$, was einer Signalgeschwindigkeit von $2{,}56 \cdot c$ entsprechen würde [1]. Interessanter Weise stehen also schon viele praktische Anwendungen und Experimente im Zusammenhang mit der Frage nach dem Auftreten von Überlichtgeschwindigkeiten. Die Problematik der Messung, der Signaldämpfung, der Dispersion, der Signalreflexion, der Frequenzabhängigkeit der Signalgeschwindigkeit usw. werden in [1] behandelt.
Bei der Übertragung eines Signals über einen unterdimensionierten Hohlleiter ist jedoch der folgende *Einwand* zu beachten: Bei dieser Übertragung unter Ausnutzung des Tunnelprozesses kommt es zu einer Verformung des Wellenpaketes (der Wellengruppe), sodass sich das Intensitätsmaximum in Ausbreitungsrichtung verlagert. Orientiert man sich bei der Geschwindigkeitsmessung an diesem Maximum (vor und nach der Tunnelstrecke), so wird eine Überlichtgeschwindigkeit registriert. Davon ausgehend kann aber nicht die Signalgeschwindigkeit, sondern lediglich die Gruppengeschwindigkeit eine Überlichtgeschwindigkeit erlangen, welche dann größer als die Signalgeschwindigkeit wird. In der Regel sind die Gruppen- und die Signalgeschwindigkeit (die Signalgeschwindigkeit ist gleich der Energiegeschwindigkeit) gleich groß. Im obigen Falle der Signalübertragung, bei der es zu einer Impulsverformung kommt, ist dies aber nicht mehr der Fall. Dass die Phasengeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle ebenfalls die Signalgeschwindigkeit (und die Gruppengeschwindigkeit) überschreiten kann, haben wir im Zusammenhang mit Dispersionseffekten gesehen.

7 Bedingungsabhängigkeiten der Naturkonstanten und Überlichtgeschwindigkeiten

Wir wollen nun untersuchen, ob sich veränderte Grenzgeschwindigkeiten ergeben können, wobei die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nur eine mögliche Grenzgeschwindigkeit unter bestimmten Bedingungen ist.
Wir beachten hierzu: Konstanten liegen unter bestimmten physikalischen Bedingungen in Raum und Zeit fest. Wenn sich jedoch diese physikalischen Bedingungen verändern, so

müssen sich auch die Konstanten verändern. Wenn wir aber beispielsweise eine Veränderung der Gravitationszahl, gebrochene elektrische Ladungen und eventuell veränderte Wirkungsquanten unter bestimmten Bedingungen folgern, so folgt aus solchen Veränderungen auch eine Veränderung z.B. eine Vergrößerung der Grenzgeschwindigkeit im betrachteten Raum unter den gegebenen Bedingungen. Das bedeutet jedoch, dass dann auch Überlichtgeschwindigkeiten zu folgern wären.
Wir wollen dies noch etwas näher ausführen:
Wenn man in einer allgemeinen, 5-dimensionalen Feldtheorie (z.B. in einem Raum mit Krümmung und Torsion) den Elektromagnetismus mit der Gravitation vereinheitlicht, also aus einer geometrischen Wurzel heraus erklärt, so kann man daraus die Existenz weiterer Felder (Skalarfelder) folgern, welche man mit einer variablen Gravitationszahl in Verbindung bringen kann. Aber auch von der Elementarladung können „Bruchstücke“ existieren, wie die folgenden Überlegungen zeigen. Zum einen setzen die Quarkmodelle gebrochene elektrische Ladungen voraus und auf der anderen Seite können solche Ladungen aus Quanteneffekten gefolgert werden, z.B. dem fraktionierten Quanten-Hall-Effekt.
Betrachtet man einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld, so baut sich senkrecht zur Stromrichtung eine Spannung, die Hall-Spannung auf (Hall-Effekt). Bei niedrigen Temperaturen und einem starken Magnetfeld ergibt sich, dass die Hall-Spannung und der Hall-Widerstand quantisiert sind (für die Elektronen die sich effektiv in zwei Dimensionen bewegen). Der Hall-Widerstand ist dann ein ganzzahliger Bruchteil eines Widerstandsnormales (von-Klitzing-Konstante), welches durch das Plancksche Wirkungsquantum und die Elementarladung bestimmt wird. Desweiteren gibt es den fraktionierten Quanten-Hall-Effekt mit nichtganzzahligen Werten (Das Widerstandsnormal ist dann kein ganzzahliges Vielfaches des Hall-Widerstandes), den man mit einer gebrochenen Elementarladung in Verbindung bringen kann.
Wenn sich aber derartige Naturkonstanten verändern können (also nur Konstanten unter definierten Bedingungen sind), so würde sich z.B. bei Voraussetzung der gleichen Wechselwirkungsstärke auch die Grenzgeschwindigkeit verändern, weil sie mit den anderen Konstanten (wie man ausgehend von den Feinstrukturkonstanten der diversen Wechselwirkungsarten erkennt) zusammenhängt. Eine größere Grenzgeschwindigkeit würde aber eine Erweiterung der Relativitätstheorie nach sich ziehen und sie würde zu einer Abschwächung der relativistischen Effekte führen, mithin kann dies auch zu einer Veränderung des Gravitationsradius führen [2]. Die Relativitätstheorie wird damit aber keinesfalls widerlegt, es wird hiermit nur ausgesagt, dass es Bereiche oder Bedingungen geben kann, welche zu weiteren Grenzgeschwindigkeiten führen. Wir verweisen hierzu auf unseren Beitrag [2].

8 Grenzbereiche, Quanteneffekte und Überlichtgeschwindigkeiten

In *Grenzbereichen der relativistischen Physik*, im ultrarelativistischen Bereich, also bei Geschwindigkeiten sehr nahe der Lichtgeschwindigkeit oder bei extrem hohen Massedichten, ist zu erwarten, dass Bedingungen entstehen können, welche Überlichtgeschwindigkeiten zulassen (Man beachte auch weitere Grenzen physikalischer Größen und generell starke Felder oder Feldänderungen). Dies ist deshalb der Fall, weil wir dann zusätzlich *Quanten- und Umwandlungseffekte (in Strahlung)* zu beachten haben. Die Relativitätstheorie stößt hier an ihre Grenzen. Eine hierbei auftretende Veränderung der Gravitationszahl (z.B. bei extremen Massedichten) wird dann mit einer Veränderung der Grenzgeschwindigkeit einhergehen. Wir

verweisen auch auf die Möglichkeiten der Entstehung zusätzlicher, andersartiger Felder und auf den ebenfalls diskutierten Fall der Absorption und Selbstabsorption der Schwerkraft. Außerdem haben wir die Wechselwirkungen der Felder mit dem Vakuum zu berücksichtigen (z.B. bei starken Gravitationsfeldern oder elektromagnetischen Feldern), was wiederum mit Teilchenentstehungsprozessen verbunden ist. Wir wissen auch nicht, was sich in einem *Subquantenbereich* abspielt, wenn wir z.B. annehmen, dass Quanten (z.B. Feldquanten) wieder aus Quanten bestehen oder selbst wieder bestimmte Quanten austauschen. Dies könnte auch auf ein noch kleineres weiteres Wirkungsquantum und auf Überlichtgeschwindigkeiten im Subquantenbereich hindeuten [3]. In diesem Zusammenhang verweisen wir auch darauf, dass die allgemeine Relativitätstheorie und damit auch die Feldgleichungen im Bereich einer Singularität auf ihre Grenzen stoßen. Auch hier müssen Quanteneffekte und eventuell zusätzliche Skalarfelder berücksichtigt werden.

9 Wechselwirkungen, Konstanten und Überlichtgeschwindigkeiten

Mit den 4 grundlegenden Wechselwirkungsarten (elektromagnetische Wechselwirkung, Gravitation, starke und schwache Wechselwirkung) verbinden wir nicht nur bestimmte Symmetriegruppen und Erhaltungssätze, sondern auch bestimmte Konstanten z.B. Feinstrukturkonstanten. Auf der anderen Seite ergibt sich auch die Grenzgeschwindigkeit aus diesen charakteristischen Konstanten.
Bislang kam als Grenzgeschwindigkeit lediglich die Lichtgeschwindigkeit in Frage, doch deuten neue Experimente darauf hin, dass Neutrinos Überlichtgeschwindigkeiten erreichen können. Neutrinos sind schwach wechselwirkende Teilchen mit einer sehr geringen Masse, welche z.B. beim Betazerfall und bei Kernfusionsprozessen entstehen. Es gibt 3 verschiedene Arten von Neutrinos (Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino), welche sich ineinander umwandeln. Unter Ausschluss unterschiedlichster Fehlerquellen, hat man immer wieder Überlichtgeschwindigkeiten von Neutrinos gemessen.
Es ist naheliegend, dass in diesem Falle eine Überlichtgeschwindigkeit auf neue Wechselwirkungseigenschaften hindeutet. Für die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung und die Gravitation bestimmt das Verhältnis der entsprechenden Kopplungskonstante zur betreffenden Feinstrukturkonstante die Grenzgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit). Bei der schwachen Wechselwirkung ist das reziproke Verhältnis dieser entsprechenden Größen für die Bestimmung der Grenzgeschwindigkeit von Bedeutung. Außerdem geht das Plancksche Wirkungsquantum in diese Beziehungen mit ein [2].
Hierbei wollen wir die Kopplungskonstanten durch spezifische Wechselwirkungskonstanten und spezifische Ladungen oder Massen bestimmen. Dabei können wir jeweils für die elektromagnetische Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung die Dielektrizitätskonstante mit bestimmten Elementarladungen und für die schwache Wechselwirkung und die Gravitation die Fermikonstante bzw. die Gravitationskonstante mit der Protonenmasse verbinden.
Je größer die Kopplungskonstante, desto stärker auch die Wechselwirkung u.U. wodurch schließlich die Festlegung der Grenzgeschwindigkeit erfolgt. Jetzt stellen wir uns aber eine andere Art Wechselwirkung vor, bei der die Feinstrukturkonstante kleiner gegenüber der Kopplungskonstante wird, als es z.B. gegenüber der elektromagnetischen Wechselwirkung der Fall ist , oder aber es gäbe bei dieser Wechselwirkung eine noch kleinere Wirkung, als es durch das Plancksche Wirkungsquantum ausgedrückt wird (wie oben erwähnt). Dann erhalten wir eine Überlichtgeschwindigkeit, die in diesem speziellen quantenphysikalischen Bereich zur Grenzgeschwindigkeit wird. Mithin sind dann für das betrachtete Teilchen unter den gegebenen Voraussetzungen und Bedingungen Überlichtgeschwindigkeiten möglich.

Ausgehend von der schwachen Wechselwirkung erhalten wir eine Überlichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit dann, wenn sich das Verhältnis der entsprechenden Feinstrukturkonstanten zur Kopplungskonstanten vergrößern kann.

Da die Neutrinos eine äußerst schwache Wechselwirkung zeigen, ist es naheliegend, dass sich dieses Verhältnis verändern kann, was dann auch mit weiteren Änderungen von Naturkonstanten oder der Einführung neuer Naturkonstanten zusammenhängt (Man denke etwa daran, dass in diesem Fall für die Kopplungskonstante eine kleinere Konstante als die Fermikonstante maßgebend sein kann).
Wenn eine Art Wechselwirkung entsteht, bei der das Verhältnis der Kopplungskonstante zur Wechselwirkungsstärke verändert wird, dann wären Überlichtgeschwindigkeiten möglich und mithin auch eine weitere obere Grenzgeschwindigkeit für die betrachteten Teilchen. Hierzu können wir bestimmte Wechselwirkungsfaktoren einführen (in Verbindung mit der betreffenden Wechselwirkungskonstante, der Kopplungskonstante und des Planckschen Wirkungsquantums).
Allgemein lässt sich daraus folgern: Je nach Größe dieser Wechselwirkungsfaktoren werden dann unterschiedliche Grenzgeschwindigkeiten (welche i.a. größer oder kleiner als die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit sein können) festgelegt. Es ist dabei wahrscheinlich, dass wir es dann mit einer neuen Art von Wechselwirkung zu tun haben, welche gegenüber anderen Wechselwirkungsarten dominierend wird. Wir wollen dabei Wechselwirkungen unterscheiden, bei denen das Produkt der jeweiligen charakteristischen Längen- und Impulskonstante kleiner (wie z.B. bei der schwachen Wechselwirkung und der Gravitation) oder größer als das Plancksche Wirkungsquantum ist (wie z.B. bei der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung) und wobei Beziehungen der Wechselwirkungskonstanten zueinander durch charakteristische Ladungen und Längen bestimmt werden [2]. Im Zusammenhang mit der Gravitation und der schwachen Wechselwirkung könnte man damit auch kleinere Wirkungsquanten folgern.
Die *charakteristischen Längen* seien für die Gravitation durch die Planck-Länge, für die schwache und die starke Wechselwirkung durch dessen Reichweite und für die elektromagnetische Wechselwirkung durch den Bohr-Radius gegeben. In sämtliche Bestimmungsgleichungen für diese Längenkonstanten geht das Plancksche Wirkungsquantum ein. Für die starke Wechselwirkung und für die elektromagnetische Wechselwirkung gehen neben dem Planckschen Wirkungsquantum und der Dielektrizitätskonstante charakteristische Elementarladungen und Massen in die Bestimmung für die charakteristische Längenkonstante ein. Für die schwache Wechselwirkung und die Gravitation gehen neben dem Planckschen Wirkungsquantum und der Lichtgeschwindigkeit charakteristische Konstanten, nämlich die Fermikonstante für die schwache Wechselwirkung und die Gravitationskonstante für die Gravitation in die Bestimmung für die entsprechenden Längenkonstanten ein.
Die *charakteristischen Impulskonstanten* ergeben sich aus dem Produkt der Elektronenmasse mit der Lichtgeschwindigkeit (bei der elektromagnetischen Wechselwirkung) oder aus dem Produkt der Protonenmasse mit der Lichtgeschwindigkeit.
Es ist interessant, dass die Feinstrukturkonstanten der schwachen Wechselwirkung und der Gravitation über charakteristische Längen und die Feinstrukturkonstanten der starken Wechselwirkung und der elektromagnetischen Wechselwirkung über charakteristische Ladungen miteinander im Zusammenhang stehen [2].

Hinweise auf eine Veränderung der Feinstrukturkonstanten (zumindest der Feinstrukturkonstanten der elektromagnetischen Wechselwirkung) liefern manche String-Theorien. Hiernach kann eine leichte Schwankung oder eine kontinuierliche Zunahme der Feinstrukturkonstanten auftreten. Mit Hilfe von Rubidium-Atomuhren (in denen Laser die Atome abkühlen und Mikrowellen den Spin ihrer Elektronen umklappen lassen) kann man die Suche nach den Fluktuationen der Feinstrukturkonstanten vornehmen.
Wir fassen noch einmal kurz zusammen, wann wir Überlichtgeschwindigkeiten bzw. weitere Grenzgeschwindigkeiten zu erwarten haben:

1 In Verbindung mit einer Veränderung der Gravitationszahl und der Veränderung weiterer Naturkonstanten in Abhängigkeit von den Bedingungen im physikalischen Raum.

2 In Verbindung mit neuartigen Wechselwirkungen bzw. dem Auftreten neuer Wechselwirkungseigenschaften, bestimmten Effekten (z.B. Tunneleffekt), Feldern (insbesondere Skalarfeldern) und besonderen Teilcheneigenschaften.

3 In Verbindung mit Quanteneigenschaften

4 In Verbindung mit Eigenschaften in Grenzbereichen der relativistischen Physik

Hierbei sei noch einmal erwähnt, dass auch eine Überlichtgeschwindigkeit als Signal-Gruppen- und Teilchengeschwindigkeit dem Kausalitätsprinzip nicht zwangsläufig widersprechen muss (siehe oben).

Wenn auch unsere Annahmen und Folgerungen noch weitere Untersuchungen erfordern, so betonen wir, dass wir nicht davon ausgehen können, dass alle Teilchen, Felder, Wechselwirkungen und Grenzen schon erkannt sind, vielmehr werden wir immer wieder neue Erkenntnisse gewinnen. Es werden also immer bestimmte Grenzen bzw. Naturkonstanten zu berücksichtigen sein bzw. es werden neuartige Grenzen auftauchen. Diese Grenzen werden sich aber letztlich immer als bedingungsabhängig, als relativ erweisen, wenn sie auch zunächst als absolute Grenzen angesehen werden können. Wir werden damit in Weiterführung dieser Überlegungen auf die Unerschöpflichkeit der Materie geführt, was auch die Begründung dafür darstellt, dass die Erkenntnisgewinnung in allen Richtungen immer weiter verläuft. Auch ein Feld, ein Teilchen usw. kann damit insgesamt gesehen keine absolute Bedeutung erlangen. Es wird damit kein Urfeld, kein Urteilchen, mithin auch keine Urtheorie usw. geben[3]. Es wird sich aber eine Theorie immer wieder in eine andere, übergeordnete Theorie eingliedern, sich als Spezialfall dieser übergeordneten Theorie erweisen und gerade solche hierarchische Aufbauprinzipien gibt es auch für die Materie.

Nun sind aber Quarks (es sind Teilchen mit gebrochener elektrischer Ladung) aus der Quantenchromodynamik gefolgert worden. Danach sollen Baryonen und Mesonen aus Quarks bestehen, welche durch die starke Kraft zusammengehalten werden. Einzelne Quarks lassen sich jedoch nicht nachweisen. Desweiteren sind Higgs-Bosonen vorhergesagt worden, wobei durch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld die Teilchen ihre Masse erhalten sollen. Jedoch sind die Higgs-Bosonen bislang nicht nachgewiesen. Wir verweisen darauf, dass nicht alles, was sich aus einer Theorie logisch folgern lässt, auch existieren muss. Insbesondere

gäbe es nach unseren Überlegungen auch keine endgültige, allumfassende Theorie und kein Urteilchen. Überlichtgeschwindigkeiten sind jedoch auch als Signal- Gruppen- und Teilchengeschwindigkeiten nicht ausgeschlossen, wie dieser Beitrag zeigen sollte.

Literatur:

[1] Nimtz G. und Haibel A.: Tunneleffekt-Räume ohne Zeit, WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2004.

[2] Döbbecke, T.: Gibt es Überlichtgeschwindigkeiten als Signal- und Teilchengeschwindigkeiten?, GRIN Verlag, 2011.

[3] Döbbecke, T.: Grundsatzfragen der Quantentheorie, GRIN Verlag, 2010.