

Anmerkungen zu einigen Quellen, die das Machsche Prinzip behandeln

Im vorliegenden Beitrag analysiere und bewerte ich die Erklärungen zum Machschen Prinzip, die in verschiedenen Quellen gegeben werden. Dabei werden auch Aussagen anderer Theorieansätze herangezogen, die sich auf das Machsche Prinzip stützen, es verwenden oder es interpretieren.

Quelle:

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/machsches-prinzip/9262>:

Lexikon der Physik: Machsches Prinzip

„Machsches Prinzip, Hypothese, daß die Trägheitskräfte durch die Gesamtheit der im Universum vorhandenen Materie verursacht werden. Dementsprechend sollte in einem Gedankenversuch die Trägheit eines Körpers verschwinden, wenn sämtliche übrige Materie entfernt wird.“

Mit dieser Erklärung ist das Machsche Prinzip nicht verständlich dargestellt, und sie enthält Fehler. Die Trägheit wird nicht durch andere Massen im Universum „verursacht“, denn Trägheit ist die Eigenschaft einer einzeln betrachteten Masse. Die Abwesenheit anderer Massen ist nicht als Ursache für ihr Verschwinden anzusehen. Trägheit ist das Beharrungsvermögen einer betrachteten Masse (eines Körpers), ihren Bewegungszustand in einem gegebenen Inertialsystem beizubehalten, wenn auf sie (auf ihn) keine Kraft wirkt. Wenn jedoch, wie im Gedankenexperiment angenommen, sämtliche übrige Materie im Universum entfernt wird und es nur den einen betrachteten Körper gibt, hat für ihn dann jedoch der Begriff *Bewegung* keinen physikalischen Inhalt mehr, denn *mechanische Bewegung* ist stets die Änderung der Raumposition eines Körpers relativ zu einem anderen Körper. Dabei ist gleichgültig, welcher der beiden Körper als ruhend und welcher als bewegt angesehen wird oder ob beide als bewegt verstanden werden. Diese Interpretation heißt Relativitätsprinzip. Hierin besteht die Kritik Ernst Machs an der Newtonschen Mechanik, der den Körper relativ zu einem absoluten Raum betrachtet, so daß für seine Bewegung kein zweiter Körper vonnöten wäre. Mit anderen Worten ausgedrückt beschreibt Newton den Raum als ein autark existierendes Objekt, in dem sich ein anderer Körper befinden kann oder nicht. Ein solches materielles Objekt *Raum* gibt es nicht. Raum ist eine immaterielle Existenzbedingung der Materie. Aus diesem Grund gibt es kein absolut ruhendes Inertialsystem im Universum. Alle Bewegungen der Körper können nur relativ zueinander betrachtet werden. Gibt es, wie im Gedankenexperiment angenommen, nur einen Körper, so ist ein Bewegungsbegriff nicht erklärbar. Es gibt diesen Begriff nicht. Für die Beschreibung einer Bewegung bedarf es mindestens eines zweiten Körpers, relativ zu dem sich der erste Körper im Raum positioniert. Die Änderung dieser Position ist die Bewegung. Das ist das Wesen des Relativitätsprinzips. Fehlt der andere Körper, so ist eine Änderung der Raumposition nicht definierbar. Im obigen Gedankenexperiment kann sich jedoch ein Beobachter nur im System dieses einen Körpers befinden, relativ zu dem er sich in Ruhe befindet. Galileo Galilei formulierte das Relativitätsprinzip wie folgt:

„Ein Passagier in einer fensterlosen Kabine unter Deck eines Schiffes kann nicht wissen, ob das Schiff in Bewegung ist oder nicht.“

Das heißt, den Begriff *Bewegung* gibt es nicht, wenn kein weiteres Objekt sichtbar ist, relativ zu dem eine Bewegung bestimmt werden kann. Das jedoch ist nicht gleichzusetzen mit einer Bewegung, die den Wert Null hat, denn das wäre der Spezialfall der

relativen Ruhe einer vorhandenen Bewegung relativ zu einem zweiten Objekt. Der Bewegungswert Null kann dann durch das Wirken einer Kraft zwischen beiden Objekten einen anderen Bewegungswert annehmen. Im Experiment ist aber kein zweites Objekt vorhanden. Da aber auch die Kraft eine Wirkung zwischen zwei Objekten ist, hat auch sie beim Fehlen eines zweiten Objektes keinen physikalischen Inhalt, der Begriff *Kraft* ist nicht erklärbar. Man kann dann auch nicht mehr von einer *Trägheit* sprechen, weil Trägheit der Widerstand eines Körpers gegen eine Veränderung der Raumposition (also einer Bewegung) ist, die durch eine Kraft herbeigeführt wird. Ohne Bewegung kann auch der Begriff Trägheit nicht definiert werden. Das ist ebenso unmöglich, wie man den Bewegungsvektor eines Segelboots nicht verändern kann, indem man auf dem Boot befindlich den Mast zu schieben versucht. Eine solche Kraft kann nicht zur Änderung der Bewegung des Bootes führen, weil kein anderes System vorhanden ist, relativ zu dem diese Kraft wirken kann. Im vorliegenden Falle ist *actio gleich reactio*, im System *Boot* wirkt keine Kraft. Beim Fehlen des Begriffsinhaltes *Bewegung* hat folglich auch der Begriff *Trägheit* keinen Sinn. Die Trägheit eines Körpers kann also nicht verschwinden, denn sie ist eine Eigenschaft der Masse eines einzeln betrachteten Körpers, jedoch ist sie im konstruierten Fall nicht mehr erklärbar, weil es den Begriff *Bewegung* nicht gibt. Folglich gibt es sie als physikalische Entität nicht. Trivial: Ein Vater zeugt mit einer Mutter ein Kind. Für den konstruierten Fall, daß es den Vater oder die Mutter oder beide nicht gibt, kann es auch das Kind nicht geben.

Unter den Bedingungen des obigen Gedankenexperiments muß auch die Gravitation anders interpretiert werden. Die Gravitation ist eine Kraft zwischen genau zwei Massen. Für den Fall einer einzeln betrachteten Masse „verschwindet“ sie nicht, sie wird nicht zu Null, sondern es gibt sie als physikalische Kategorie nicht, weil die eine Gravitation definierende Voraussetzung der Anwesenheit zweier Massen nicht gegeben ist. Verschwinden hieße, daß die Gravitation Null wird. Das aber ist nicht korrekt, denn sie wäre dann mit dem Wert Null vorhanden. Das aber ist nicht der Fall. Für eine allein betrachtete Masse gibt es den Begriff *Gravitation* nicht. Deshalb kann eine einzeln betrachtete Masse nicht mit einem „Gravitationsfeld umgeben“ sein. Daraus folgt weiter, daß sie von einer Masse auch nicht „abgestrahlt“ werden kann. Würde sie abgestrahlt, wäre sie Energie und damit Materie, sie würde sich im Raum ausbreiten, also bewegen. Das aber wiederum heißt, nachdem sie „abgestrahlt“ ist, würde sie ohne die abstrahlende Masse existieren. In der Newtonschen Gravitationsgleichung für die Gravitationskraft $G = \gamma \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$ (γ - Gravitationskonstante) würde ohne die obige Betrachtungsweise ein Nullwert $G = 0$ entstehen, wenn $m_1 = 0$ oder $m_2 = 0$ ist. Da beide Nullwerte aber das Fehlen einer der Massen aussagen, kann nicht mehr von einer Gravitationskraft gesprochen werden, sie ist als physikalische Kategorie nicht definierbar. So entsteht durch diese Traktionsweise die Notwendigkeit der Bildung eines Grenzwertes $\lim_{m_1 \rightarrow 0} G$ oder $\lim_{m_2 \rightarrow 0} G$, der wegen des Fehlens einer der Massen m_1 oder m_2 das Fehlen des Begriffes Gravitation ausweist. Auf diese Weise ist auch die Fortsetzung des oben eingeleiteten Zitats aus dem *Lexikon der Physik* zu verstehen:

„E. Mach formulierte diese Überlegung 1883 ausgehend von einer kritischen Analyse der Newtonschen Mechanik und insbesondere des Newtonschen Eimerversuchs: die parabolische Wölbung der Oberfläche eines mit Wasser gefüllten, rotierenden Eimers kennzeichnet ein gegen den absoluten Raum rotierendes Bezugssystem. Da es aber, so Mach, keinen absoluten Raum gibt, entsteht die Zentrifugalkraft als Ursache der Wölbung aufgrund der Rotation relativ zu den Fixsternen. Die umgekehrte Situation, nämlich die Rotation der Fixsterne um den ruhenden Eimer, ist nach Mach weder gedanklich noch experimentell

vom Newtonschen Eimerversuch unterscheidbar, deshalb muß die Wasseroberfläche auch hier gewölbt sein.“

Das Machsche Prinzip ist in dieser Beschreibung die Anwendung des durch Galileo Galilei formulierten Relativitätsprinzips auf die Rotationsbewegung. Die Relativität der longitudinalen (translativen) Bewegung zweier Körper relativ zueinander ist ohne weiteres verständlich (siehe oben). Die Rotation eines Körpers als relativ zu einem anderen System zu erkennen, ist schwieriger vorstellbar. Tatsächlich ist aber auch die Rotation eines Körpers ohne die Anwesenheit eines anderen, eines zweiten Systems ohne physikalischen Inhalt, weil die Frage, relativ zu welchem Beobachter (welchem System) eine Rotation vorliegt, nicht beantwortet werden kann. Ohne ein solches System gibt es den Begriff *Rotation* nicht, weil es kein absolut ruhendes Inertialsystem im Universum gibt, in dem eine Rotation feststellbar wäre. Das ist aber nicht als Rotation mit der Winkelgeschwindigkeit Null zu interpretieren, denn das wäre der Spezialfall einer bestehenden Rotation mit der Drehgeschwindigkeit Null, die bei Einwirkung eines Drehmoments einen anderen Wert annehmen könnte. Im Gegensatz dazu gibt es im konstruierten Fall aber den Begriff *Rotation* nicht. Es gibt keinen Beobachter außerhalb des Systems, der eine Rotation erkennen könnte, weil kein anderes Inertialsystem vorhanden ist. So hat folglich auch die Frage nach der Drehträgheit keine Antwort. Für die Beobachtung einer Rotation ist folglich ein zweites Inertialsystem erforderlich, relativ zu dem das beobachtete rotiert. Nun kann der Beobachter sich sowohl in dem einen als auch in dem anderen System befinden. An jedem dieser Orte wird er das jeweils andere System als rotierend wahrnehmen. Es ist also gleichgültig, welches der beiden als ruhend (nicht rotierend) und welches als rotierend angesehen wird, oder ob beide als rotierend mit verschiedenen Drehgeschwindigkeiten verstanden werden. Daraus ergibt sich zwingend, daß die Rotation eine ebenso relative Bewegungsart wie die longitudinale Bewegung ist. Die parabolische Wölbung der Wasseroberfläche im Newtonschen Eimerexperiment ist somit unabhängig vom Ort des Beobachters und auch unabhängig davon, ob etwa eines der Systeme als ruhend angesehen wird, weil die Annahme „ruhend“ völlig willkürlich vom Beobachter festgelegt wird. Das gilt sowohl für die Longitudination als auch für die Rotation. Man kann für diese Erkenntnis eine Überlegung anstellen, die das anschaulich verdeutlicht. Ein geostationärer Satellit umkreist die Erde in einer Höhe von etwa 36.000 km. In dieser Entfernung ist bei einer Umlaufzeit von 24 Stunden die durch Gravitation entstehende Zentripetalkraft gleich der orbitalen Zentrifugalkraft, so daß der Satellit in dieser Höhe bleibt. Nehmen wir nun den Satelliten gegenüber einem absoluten Raum als ruhend an, müßte er senkrecht auf die Erde herabfallen, weil er dann keiner Zentrifugalkraft unterliegen würde. Daß dies aber nicht eintritt, können wir nur damit erklären, daß es ohne Belang ist, ob der Satellit die Erde umkreist oder umgekehrt. Ich habe am Ende des Beitrages eine Episode^{ep)} beschrieben, mit der die Relativität der Bewegung erlebbar wird.

Quelle:

https://de.wikipedia.org/wiki/Machsches_Prinzip

Wikipedia: Machsches Prinzip

*„Das **Machsche Prinzip** ist ein nach Ernst Mach benanntes physikalisches Prinzip, mit dem er die Begründung der Existenz eines absoluten Raumes durch Isaac Newton in dessen Eimer-Experiment kritisierte. Nach dem Machschen Prinzip kann man nicht von einer Bewegung eines Körpers bezogen auf einen absoluten Raum sprechen, sondern nur von Bewegungen in Bezug zu allen anderen Körpern des*

Universums. Insbesondere betrifft das die Definition von Inertialsystemen und die Wirkung von Trägheitskräften. Das Prinzip spielte eine Rolle bei der Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein, nach der die Krümmung der Raumzeit erst durch die in ihm liegende Materie und Energie bestimmt wird.“

Die Formulierung „Materie und Energie“ ist unverständlich. Wie lange noch will Wikipedia an einem so elementaren Fehler festhalten? Das Ausschließen der Energie aus der Materie ist wegen der Masse-Energie-Äquivalenz ($E = m \cdot c^2$), nach der Masse und Energie zwei äquivalente Darstellungsformen der Materie sind, eindeutig als Fehler einzuordnen. Die gesamte Formulierung des letzten Satzes postuliert den Raum als eigenständig existierendes „Behältnis“ für die Materie, das auch existieren könne, wenn man die Materie aus ihm entfernt. Am Ende gibt es dann noch eine „Raumzeit“ als vierdimensionales körperliches Objekt zur Beschreibung der Materiebewegung. Solche Ansätze stehen in unlösbarem Widerspruch zur beobachteten Natur, man kann sie in keiner Weise als beobachtbare Naturkategorien ausgeben.

Man kann weder den Raum „krümmen“ noch die Zeit „stauchen“. Das ist physikalischer Unsinn, denn Raum und Zeit wären nach dieser Anschauung nicht die Existenzbedingungen der Materie, sondern selbst materielle Objekte. Um eine Linie zu krümmen, bedarf es einer zweiten Dimension, die eine Ebene bildet. Ohne Einführung einer Ebene ist die Linie eine Gerade. Um eine Fläche zu krümmen, bedarf es einer dritten Dimension, die einen Raum bildet. Ohne Einführung eines Raumes ist die Fläche eine Ebene. Um einen Raum zu „krümmen“, bedürfte es einer vierten Dimension, die einen „vierdimensionalen“ Raum bildet, eine Fiktion, die es in der Natur nicht gibt. Der Raum ist dreidimensional. Ein Raumpunkt ist durch genau drei Koordinaten eindeutig bestimmt, ein Weltpunkt (ein Ereignis) durch 4 Koordinaten: Ein Raumpunkt zu einem Zeitpunkt (Minkowski-Raum). Mehrdimensionale Räume (mehr als 3 Raumdimensionen) sind mathematische Ansätze zur Berechnung von komplexen Zusammenhängen, die mit virtuellen Mitteln einfacher ausführbar sind. In der beobachtbaren Natur gibt es sie nicht.

Zum Beispiel ist die Reduktion der Gravitation auf eine Flächendarstellung (das allbekannte „Gummituch“, in das kugelförmige Massen gelegt werden, die es unter der Schwerkraft eindellen) ein Mittel zur Veranschaulichung, jedoch kein Bild der Wirklichkeit, denn es hat elementare Grenzen, weil damit das physikalische Wesen der Gravitation entstellt und das systembezogene Denken verlassen wurde. Die „Krümmung“ eines Raumes vermag es nicht auszudrücken.

Zum Beispiel wird in der Elektrik zur Berechnung von Phasenverläufen des Wechselstroms die komplexe Zahlenebene (Gaußsche Zahlenebene) verwendet, in der senkrecht auf der reellen Zahlenachse die imaginäre Zahlenachse aufgesetzt wird. Berechnungen, die man ohne diesen Ansatz nur mit unangemessenem Aufwand bewerkstelligen könnte – wenn überhaupt – werden mit komplexen Zahlen einfach und überschaubar. Stets muß man aber beachten, daß es in der Natur die imaginären Zahlen mit der Einheit $i = \sqrt{-1}$ nicht gibt. Das heißt, niemals darf man die Berechnungsmethode zur Realität erklären. In der Mathematik können wir durchaus eine Zahl annehmen, deren Quadrat gleich minus eins ist, die wir *imaginär* (*unwirklich, nur in der Vorstellung vorhanden*) nennen, in der Physik jedoch nicht.

Nebenbei bemerkt: Man findet bei Wikipedia eine wahrlich abenteuerliche Definition:

„Eine (rein) imaginäre Zahl (auch Imaginärzahl, lat. numerus imaginarius) ist eine komplexe Zahl, deren Quadrat eine nichtpositive reelle Zahl ist. ...“

(https://de.wikipedia.org/wiki/Imagin%C3%A4re_Zahl)

Abenteuerlich nenne ich die Definition deshalb, weil ihre Autoren keine ernstzunehmenden Mathematiker sein können, denn „eine (rein) imaginäre Zahl“ ist eben **keine komplexe Zahl**. Das weiß jeder aufmerksame Gymnasialschüler, die Mathematiker bei Wikipedia aber – wie man sieht – nicht. Aber das nur am Rande.

Zur Erinnerung für Wikipedia: Eine komplexe Zahl genügt dem Term $a + bi$, sie besteht aus der reellen Komponente a und der imaginären Komponente bi mit der imaginären Einheit $i = \sqrt{-1}$.

Weiter bei Wikipedia:

„Die Aussage des Machschen Prinzips ist schwierig exakt zu formulieren und in der Literatur werden eine Vielzahl verschiedener Fassungen des Machschen Prinzips aufgeführt, die sich zum Teil wesentlich unterscheiden.“

Das Machsche Prinzip behandelt in seinem Wesen die Relativität der Rotationsbewegung. Streng genommen ist es die erweiterte Anwendung des durch Galilei formulierten Relativitätsprinzips für die longitudinale (die translative) Bewegung auf die Rotation. Dabei begründet er diese Erweiterung mit der Kritik an Newtons Eimerversuch, mit dem Newton die Existenz des absoluten Raumes und einer absoluten Zeit und einem festen Inertialsystem des Universums postulierte und dies in seiner Schrift *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica von 1687 (Buch I, Scholium)* niedergeschrieben hatte. Newton führte aus,

„man kann demnach immer nachweisen, ob das Wasser in einem Eimer sich um seine Rotationsachse relativ zu einem absoluten Raume drehe, da in diesem Fall die Oberfläche des Wassers ein Rotationsparaboloid aufgrund der Zentrifugalkräfte bilde, egal ob der Eimer selbst sich mitdrehe oder nicht.“

Wikipedia zitiert dazu eine Passage aus Machs zweitem Kapitel des Buches *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, in der Mach mit einem Hauch Sarkasmus ausführt:

„Der Versuch Newton's mit dem rotierenden Wassergefäß lehrt nur, daß die Relativdrehung des Wassers gegen die Gefäßwände keine merklichen Centrifugalkräfte weckt, daß dieselben aber durch die Relativdrehung gegen die Masse der Erde und die übrigen Himmelskörper geweckt werden. Niemand kann sagen, wie der Versuch verlaufen würde, wenn die Gefäßwände immer dicker und massiger, zuletzt mehrere Meilen dick würden. Es liegt nur der eine Versuch vor, und wir haben denselben mit den übrigen uns bekannten Thatsachen, nicht aber mit unsern willkürlichen Dichtungen in Einklang zu bringen.“

Machs Einwand gegen dieses Gedankenexperiment ist also, daß Newton den Einfluß der übrigen Materie des Universums auf das Wasser nicht berücksichtige. Newtons Experiment wäre, so Mach, nur in einem ansonsten leeren Universum von Bedeutung. Im realen Universum, in dem Materie vorhanden ist, sei statt einer Rotation relativ zu einem absoluten Raum, wie von Newton behauptet, nur eine Rotation bezogen auf die übrigen Himmelskörper für das Experiment von Bedeutung. Wie man das Zitat konkret verstehen muß, habe ich oben dargestellt. Eine andere Deutung kann man Mach nicht unterstellen. Die im Wikipedia-Text erwähnte „Vielzahl verschiedener Fassungen des Machschen Prinzips“ kann also nur durch die unterschiedliche Deutung seiner Aussage durch andere Wissenschaftler herbeigeführt worden sein, die das Prinzip mehr oder weniger vollständig verstanden haben. Dem oben genannten Zitat geht nämlich

in Machs Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, zweites Kapitel, Ziffer 5, noch ein Text voraus, der, wie ich meine, alle Zweifel an der Eindeutigkeit seiner Aussage ausräumt:

„5. Betrachten wir nun denjenigen Punkt, auf welchen sich Newton bei Unterscheidung der relativen und absoluten Bewegung mit starkem Recht zu stützen scheint. Wenn die Erde eine absolute Rotation um ihre Axe hat, so treten an derselben Centrifugalkräfte auf, sie wird abgeplattet, die Schwerebeschleunigung am Aequator vermindert, die Ebene des Foucault'schen Pendels wird gedreht u. s. w. Alle diese Erscheinungen verschwinden, wenn die Erde ruht und die übrigen Himmelskörper sich absolut um dieselbe bewegen, sodass dieselbe relative Rotation zu Stande kommt. So ist es allerdings, wenn man von vornherein von der Vorstellung eines absoluten Raumes ausgeht. Bleibt man aber auf dem Boden der Thatsachen, so weiss man blos von relativen Räumen und Bewegungen. Relativ sind die Bewegungen im Weltsystem, von dem unbekanntem und unberücksichtigten Medium des Weltraums abgesehen, dieselben nach der Ptolemäischen und nach der Kopernikanischen Auffassung. Beide Auffassungen sind auch gleich richtig, nur ist die letztere einfacher und praktischer. Das Weltsystem ist uns nicht zweimal gegeben mit ruhender und mit rotirender Erde, sondern nur einmal mit seinen allein bestimmbaren Relativbewegungen. Wir können also nicht sagen, wie es wäre, wenn die Erde nicht rotirte. Wir können den einen uns gegebenen Fall in verschiedener Weise interpretiren. Wenn wir aber so interpretiren, dass wir mit der Erfahrung in Widerspruch gerathen, so interpretiren wir eben falsch. Die mechanischen Grundsätze können also wol so gefasst werden, dass auch für Relativdrehungen Centrifugalkräfte sich ergeben.“

Weiter bei Wikipedia:

„Machs Prinzip und die Allgemeine Relativitätstheorie

Das Prinzip wurde von Albert Einstein 1918 nach Ernst Mach benannt, der es 1883 in seinem Buch „Die Mechanik in ihrer Entwicklung“, Brockhaus-Verlag Leipzig, vertreten hatte. Das Machsche Prinzip war eine der Ideen, die Einstein bei der Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie leiteten. Allerdings erwies sie sich später als nicht vereinbar mit einigen konkreten Formulierungen des Machschen Prinzip.“ ... „Albert Einstein sah eine Realisierung des Machschen Prinzips im Lense-Thirring-Effekt von 1918, was umstritten ist.“

Quelle:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Lense-Thirring-Effekt>

*„Der **Lense-Thirring-Effekt**, auch **Frame-Dragging-Effekt**, ist ein im Jahr 1918 von dem Mathematiker Josef Lense und dem Physiker Hans Thirring vorhergesagter physikalischer Effekt, der sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie ergibt. Er fällt in die Klasse der gravitomagnetischen Effekte. Der Lense-Thirring-Effekt beschreibt den Einfluss einer rotierenden Masse auf das lokale Inertialsystem. Dies kann man sich vereinfacht so vorstellen, dass die rotierende Masse den Raum um sich herum wie eine zähe Flüssigkeit mitzieht. Dadurch wird die Raumzeit verdrillt.“*

Das ist eine sehr schwammige Erklärung, in der neben allen Merkwürdigkeiten keine Kraft zu finden ist, die *den Raum um sich herum wie eine zähe Flüssigkeit „mitziehen“* soll. Vor allem bleibt die abwegige Frage, wie man wohl einen Raum dreht. Man kann die Materie drehen, die einen Raum einnimmt, den Raum selber aber nicht. Hier wird der Raum erneut als materielles Objekt dargeboten, dem man eine Bewegung unterstellen könnte. Das sind Vorstellungen weit abseits der Realität, die sich der Logik völlig entziehen. Was dabei eine „*verdrillte Raumzeit*“ bedeuten soll, liegt ganz sicher weit außerhalb jeder Möglichkeit einer verständlichen Erklärung. Es ist, gerade heraus gesagt, Unfug.

„Bei der Ableitung durch Thirring spielte die Korrespondenz mit Einstein (1917) eine wichtige Rolle und Einstein berechnete den Effekt schon im Rahmen seiner Vorläufertheorien für die allgemeine Relativitätstheorie. Die Wurzel dieser Überlegungen liegt im Machschen Prinzip, das Einstein darin realisiert sah.“

Jedoch erkennt man in diesem Herangehen auch bei Einstein Tendenzen, den Raum als ein selbständig existierendes Objekt zu interpretieren, der auch frei von Materie vorhanden sein könne, und dem man eine Bewegung zuordnen dürfe. Diese Auffassung hat Einstein erst sehr viel später korrigiert. Daß Einstein eine Realisierung des Machschen Prinzips im Lense-Thirring-Effekt sah, ist deshalb durchaus umstritten.

Quelle:

https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Machsches_Prinzip

*„Das **Machsche Prinzip** ist ein nach Ernst Mach benanntes physikalisches Prinzip zur Beschaffenheit des Raumes.¹⁾ Es widerspricht der Newtonschen Auffassung des absoluten Raumes. Nach dem Machschen Prinzip kann man nicht von einer Bewegung eines Körpers bezogen auf einen absoluten Raum sprechen, sondern nur von Bewegungen in Bezug zu allen anderen Körpern des Universums. Die allgemeine Relativitätstheorie begründet sich auf diesem Prinzip, wonach die Beschaffenheit des Raums erst durch die in ihm liegende Materie und Energie bestimmt wird.“*

Es ist generell nicht korrekt, von einer „Beschaffenheit“ des Raumes zu sprechen. Der Raum ist kein Gegenstand, der eine Beschaffenheit oder Eigenschaften haben kann. Diese Fehldeutung zeigt sich auch an anderen Stellen der Quelle. So wird unter dem Verweis *Raum* diese Aussage bekräftigt:

*1) „Der **Raum** ist eine Art „Behälter“ für Materie²⁾ und Felder, in dem sich alle physikalischen Vorgänge abspielen. Dieses bewusst etwas unpräzise Verständnis des Begriffes „Raum“ ist seit Isaac Newton allgemein verbreitet und wurde erst durch Einstein infrage gestellt.“*

Auch der in der gleichen Quelle gegebene Materiebegriff wird nicht auf dialektisch-materialistischer Grundlage beschrieben. Die Verwendung dieser Definition führt zwangsläufig zu einer Reihe von fehlerhaften Theorien in der Physik und in anderen Naturwissenschaften. Es wird gesagt:

*2) **Materie** (von lateinisch *materia*, Stoff) ist in den Naturwissenschaften eine Sammelbezeichnung für alles, woraus physikalische Körper aufgebaut sein können, also chemische Stoffe bzw. Materialien, sowie deren Bausteine. Die Beschreibung der Zusammensetzung, Struktur und Dynamik von Materie in ihren verschiedenen Formen ist eine zentrale Zielsetzung der Physik.*

In der klassischen Physik stehen der Materie die Begriffe Vakuum und Kraftfeld gegenüber. Hierbei haben Vakuum und Kraftfeld keine Masse, sondern beschreiben einen Zustand des leeren Raums. Unter Materie hingegen versteht man in der klassischen Physik alles, was Raum einnimmt und eine Masse besitzt.“

Diese Definition ist, wie man leicht feststellen kann, wörtlich von Wikipedia übernommen. Ihr Grundfehler ist die Eingrenzung des Materiebegriffs auf die Stofflichkeit. Damit ist er insgesamt auf die Teilchenphysik und die Quantenmechanik nicht anwendbar. Außerdem wird die Energie prinzipiell nicht als Materie angesehen – ein Mangel mit weitreichenden Folgen. Die Möglichkeit der Existenz eines „leeren“ Raumes, eines Raumes ohne Materie also, wird damit bekräftigt. Der Raum gilt somit nicht als Existenzbedingung der Materie, sondern als materielles Objekt. Siehe auch <http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/WasIstLos.htm>.

Quelle:

<http://www.mahag.com/grav/mach.php>

Diese Quelle soll hier gesondert berücksichtigt werden, obwohl sie das Machsche Prinzip auf ebensolche Weise erklärt, wie die vorangegangenen. Interessant ist jedoch ein Umstand, der Beachtung finden soll. Wir wissen, daß Gravitation nicht der Ausbreitung unterliegt, weil sie eine Kraft ist und kein materielles Objekt, etwa Energie. Gravitation ist eine immaterielle Eigenschaft der Masse. Auch Newton ging von der instantanen Wirkung der Gravitation aus. Dabei ist er jedoch selbst in Widerspruch zum absoluten Raum geraten. Über Newtons Zweifel wird bei *mahag.com* unter dem Titel *Das Machsche Prinzip und die Relativitätsprinzipien* ausgeführt:

„Newtons bekanntes Eimer-Experiment soll die Situation verdeutlichen: Ein mit Wasser gefüllter Eimer rotiert in einem Inertialsystem um seine Symmetrieachse... Die Oberfläche des Wassers wölbt sich, da auf das Wasser infolge der Rotation Zentrifugalkräfte wirken. Diese Wölbung ist das Indiz für die Rotation gegenüber dem absoluten Raum. Newton konnte allerdings nicht erklären, wodurch dieser absolute Raum physikalisch festgelegt wird. Sowohl dieses Postulat der Existenz eines absoluten Raumes als auch die Anziehungskraft als instantane Fernwirkung empfand Newton selbst als unbefriedigende Elemente seiner Theorie.“

Diese Feststellung wird mit einem Zitat Newtons belegt, in dem er äußerte:

"Dass der Materie Schwere endogen, inhärent & essentiell eigen sein soll, so dass ein Körper über eine Distanz durch ein Vakuum hindurch auf einen anderen Körper ohne Vermittlung durch etwas Anderes einwirken kann, das ihre Wirkung & Kraft unmittelbar vom einen zum anderen übertragen würde, ist für mich eine derart große Absurdität, dass meines Erachtens kein Mensch, der philosophische Dinge kompetent bedenken kann, je auf so etwas hereinfließen könnte. Gravitation muss durch einen Überträger verursacht werden, aber ob dieser Überträger materiell oder immateriell ist, das ist eine Frage, welche ich der Überlegung meiner Leser überlassen habe."

Diese dem Leser überlassene Überlegung deutet an, daß Newton einen Mangel in seiner Theorie durchaus erkannte. Trotz seiner Überzeugung von der Existenz eines absoluten Raumes konnte er dessen Wesen nicht bestimmen. Wohl deshalb hielt er die instantane Wirkung der Gravitation ohne einen „Überträger“ für eine Absurdität.

Das sagt jedoch aus, daß er der Gravitation eine Ausbreitung über ein ihm nicht bekanntes Medium zuordnet, womit sie dann materieller Natur sein müßte. Die Fernwirkung eines Körpers „auf einen Ort, an dem er sich nicht befindet“, wie James Clerk Maxwell erkannt hatte, schloß Newton noch völlig aus. Noch heute ist dieses Problem noch nicht endgültig erklärt und bleibt Gegenstand zahlreicher Erörterungen, die auch einen Äther nicht ausschließen. Zum Beispiel bringt Christan Jooß die Idee eines Quantenäthers ins Spiel, der jedoch die Gefahr in sich trägt, wieder ein absolut ruhendes Inertialsystem zu postulieren. Ich persönlich neige zu der Auffassung, daß eine Kraft, die stets eine immaterielle Kategorie ist, für ihre Wirkung keines Mediums bedarf. Eine Kraft muß nicht, um von A aus auf B zu wirken, von A nach B „übertragen“ werden. Dies würde einer Ausbreitung, also einer Bewegung gleichkommen, wohl wissend, daß nur Materie in Bewegung sein kann. Wiederum würden wir dadurch einer Kraft einen materiellen Status geben, den sie nicht haben kann. Sehen wir mit dieser Vorgehensweise auf das nachfolgende Zitat, könnte diese Auffassung deutlicher werden:

„Das Machsche Prinzip beseitigt nicht nur einen wesentlichen Mangel der Newtonschen Theorie, sondern ist auch von der Logik her plausibler: Bei Newton ist die Trägheit das Resultat einer Beschleunigung gegenüber dem absoluten Raum, der ohne physikalische Qualitäten bleibt. Auf diesen ist daher keine Rückwirkung denkbar. Da bei Mach die Beschleunigung zu einer relativen Größe wird, ist dagegen eine Rückwirkung auf die für die Trägheit verantwortlichen Massen mit inbegriffen.“

Richtig. Man darf dies aber keinesfalls so verstehen, daß für die Trägheit andere Massen als die der Trägheit unterliegende „ursächlich“ sind, sie sind lediglich für die generelle Möglichkeit, von einer Bewegung zu sprechen, unverzichtbar, weil alle Bewegung relativ ist. Und erst der Begriff der Bewegung (der Materie) ermöglicht die Bestimmung aller anderen ihrer eigenen Auswirkungen wie Kraft, Trägheit, Gravitation, Geschwindigkeit usw.

^{ep)} Eine Episode, mit der die Relativität der Bewegung erlebbar wird.

Am Bahnhof Leipzig-Plagwitz, an dem wir uns als Kinder häufig aufgehalten hatten, gab es am Bahnhofsgebäude eine Plattform auf der Bahnseite, die mit einem Zaun vom angrenzenden Gleiskörper abgegrenzt war, auf dem zu Zeiten lange Güterzüge in einem Abstand von weniger als einem Meter vom Zaun vorbeirollten. Wir haben uns bei solchen Durchfahrten ganz nahe an den Zaun gestellt, mit den Füßen auf dem unteren Querträger, so daß die vorbeifahrenden Waggons der Züge unser gesamtes Blickfeld einnahmen. Nach einigen Sekunden entsteht ein optischer Eindruck, den wir vorher nicht erwartet hatten: Wir hatten das überwältigende Gefühl, der Zug stünde still und wir bewegten uns mit der Bahnplattform entgegen seiner Fahrtrichtung an ihm vorüber. Dies war ein beeindruckendes Phänomen für uns, da wir ja über den Täuschungseffekt gegen die tatsächliche Sachlage völlige Klarheit hatten. Damals, als Kinder, haben wir das nur als interessantes Spiel aufgenommen, erst viel später, als ich Physik studierte, konnte ich aus der Erinnerung an dieses Erlebnis erkennen, daß durch dieses Spiel mit den Sinnen die Relativität der Bewegung des Zuges zur Erde erlebbar geworden war. In der Tat ist ja vom physikalischen Standpunkt die Annahme, der Bahnhof sei ein ruhendes Inertialsystem, wenngleich das im Allgemeinen als normal bewertet wird, in Wahrheit subjektiv und ganz vom Betrachter abhängig.