



Das machsche Paradoxon

Hypothese oder Realität?

R. Sydow, Niederfinow (Deutschland)
(2022)

abstrakt: Newton deklarierte den absoluten Raum und begründete das mit seinem rotierenden, mit Wasser gefüllten Eimer, in welchem die Wasseroberfläche nur bei einer Rotation parabolische Form annimmt. Dementgegen legte Mach fest, dass der Raum relativ sein muss und sich alles in Relation zum Fixsternhimmel bewegt. Beide sahen die Trägheit von Massen als Beweis für ihre Hypothese.

Das Problem wird diskutiert und auf die Linearitätsbedingung der speziellen Relativitätstheorie zurückgeführt. Die sich aus einer nichtlinearen Bewegung ergebende Trägheit wird als Energieerhaltung während des Prozesses der Bewegungsänderung aufgefasst, sodass sich daraus die Frage nach der Relativbewegung und einer absoluten Bewegung erklärt.

Quellenangabe:

Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision:

1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©:

alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungen	2
Einführung	3
Newtons Eimerexperiment	4
Machs Fixsternhimmel	7
Die Problemerkörterung	10
die Trägheit in der SRT	12
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	14
Anlagen	18
Anlage 1: Eimerexperiment und Wasseroberfläche	18
Literatur	20

Abkürzungen

ART	Allgemeine Relativitätstheorie
IS	Intertialsystem
SRT	Spezielle Relativitätstheorie



Einführung

Wenn der Titel dieses Aufsatzes direkt darauf hinweist, dass es sich bei Machs Erklärung zur Entstehung träger Massen um ein Paradoxon handelt, so ist es doch vorerst ein Prinzip. Dieses Prinzip, von dem Ernst Mach überzeugt war, sollte die Funktionsweise der Entstehung träger Massen erklären.

„Obwohl das Machsche [sic] Prinzip besonders bei der Begründung der Einsteinschen [sic] Allgemeinen Relativitätstheorie eine große Rolle gespielt hat, ist es immer noch nicht eindeutig formuliert und schon gar nicht eindeutig theoretisch realisiert. Der Grund liegt darin, daß [sic] es mehr ein Paradoxon ist, dessen Lösung gefordert werden muß [sic], aber nicht auf einfache Weise erreicht werden kann“ ([Ble] S. 1).

„Das Paradoxon ist einfach erklärt: Die Drehung der Schwingungsebene eines Foucaultschen [sic] Pendels sagt uns, daß [sic] die Erde rotiert, auch wenn am Himmel keine Sterne uns Orientierung gestatteten. Vergleichen wir diese dynamische Rotation mit dem astronomischen Tageslauf, der kinematisch bestimmten Rotation, stellen wir überrascht fest, daß [sic] beide Rotationsgeschwindigkeiten übereinstimmen“ ([Ble] S. 1).

Das von Mach formulierte Prinzip zielt gerade darauf ab, diesen Zusammenhang zwischen einer Rotation und dem Fixsternhimmel herzustellen. Er drückte es folgendermaßen aus: „Dreht sich ein Körper relativ gegen den Fixsternhimmel, so treten Fliehkräfte auf, dreht er sich relativ gegen einen anderen Körper, nicht aber gegen den Fixsternhimmel, so fehlen die Fliehkräfte“ ([Mac] S. 232).

Damit erklärt er die Entstehung von Fliehkräften aus der Rotation relativ gegen den Fixsternhimmel.

Diese Aussage, die Mach mit dem Unterton der Wahrhaftigkeit von sich gibt, ist außer durch den offensichtlichen Zusammenhang der Fliehkräfte zum Fixsternhimmel durch nichts bewiesen. Deshalb erklärt man diesen Zusammenhang zum Prinzip und nicht zum Gesetz. Es fehlt einfach der Nachweis der Wechselwirkung zwischen dem Fixsternhimmel und den aus einer Rotation resultierenden Fliehkräften. Letztere sind lediglich von der Masse des betrachteten Objektes, der Winkelgeschwindigkeit und dem Rotationsradius abhängig¹ und nicht von den Massen, die sich aus der Summe der Fixsternmassen oder umliegender Massen ergeben.

Was also bewegte Mach zu solcher Aussage?

„Machs Forderung war, die Physik so zu schreiben, daß [sic] allein die Relativbewegungen physikalische Wirkung haben“ ([Ble] S.1). Genau das wollte er mit seiner Definition der Fliehkräfte erreichen. Damit ist dann aber zu schließen, dass ohne weitere Himmelskörper außer der Erde, keinerlei Relativbewegung der Erde festgestellt werden könnte. Das Foucaultsche Pendel dürfte keine Drehung der Erde anzeigen. Erst mit dem Vorhandensein zumindest eines Fixsterns ist die Relativbewegung der Erde registrierbar und der Versuch von Foucault erbringt das bekannte Ergebnis.

Für Mach „gibt es überhaupt nur eine relative Bewegung [...]“ ([Mac] S. 232). Und er wehrte sich gegen die Interpretation Newtons, dass dieser aus dessen Eimerexperiment auf den absoluten Raum schloss.

¹ (siehe [Mes] S. 22 f.) hier findet sich die Formel für die Zentripetalkraft. Diese muss der Fliehkraft identisch sein

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



So interessant sich Machs Festlegung der Entstehung der Fliehkräfte auch anhören mag und so fest sich diese Festlegung in der modernen Wissenschaft etabliert hat, so ungewöhnlich ist der Gedanke, dass die Fliehkraft scheinbar nur durch das Vorhandensein von Massen hervorgerufen werden kann.

Es sind offensichtlich noch einige Fragen zu klären. Selbst wenn hier das Paradoxon nicht zweifelsfrei gelöst werden kann, sollen doch Möglichkeiten aufgezeigt werden, es besser zu verstehen.

Newtons Eimerexperiment

Es ist an dieser Stelle nicht wirklich von Interesse, wie sich die Wissenschaft die Entstehung von Fliehkräften vor Newton erklärte². Aber Newton, der die Gravitation als Kraftwirkung erkannte, interessierte sich für dieses Thema insbesondere.

Er suchte zu erklären, wie sich das Gleichgewicht zwischen der Gravitation und der Fliehkraft von Himmelskörpern beschreiben lässt. Dabei ist es ihm einfach, den Begriff der Gravitation³ zu erklären: „Schwere ist die Kraft, die ein Körper, der damit versehen ist, antreibt herabzufallen“ ([Klo] S. 77). Und sofort darauf folgend beschreibt er, dass es nicht zwingend der Erdmittelpunkt ist, auf den alles herabfällt. Er umschreibt dabei den Fakt, dass es jeder beliebige Himmelskörper sein kann, zu dem etwas ‚herabfallen‘ kann.

Er schreibt: „Eine Zentripetalkraft ist eine solche, durch die Körper auf einen Punkt hin, quasi als Zentrum, von allen Seiten her gezogen werden oder getrieben oder auf den hin sie irgendwie tendieren. Von dieser Art ist die Schwerkraft [...], durch die die Planeten fortwährend von ihrer geradlinigen Bewegung abgezogen werden und gezwungen werden, in gekrümmten Bahnen umzulaufen“ ([Klo] S. 106).

Die Schwerkraft so zu definieren, ist insofern simpel, weil sie allgegenwärtig in vorbestimmter Weise agiert. Es gibt keine denkbare Konstellation, in welcher die Wirkung der Schwerkraft davon abweicht, aus der Summe aller umgebenden Massen zu resultieren.

Doch wie verhält es sich mit der Beschreibung der Fliehkraft? Beschreibt Newton überhaupt die Fliehkraft? Es ist in seinen Ausführungen vielmehr von der Trägheit die Rede. Wenn sich ein Planet um die Sonne bewegt, dann würde er gern eine geradlinig, gleichförmige Bewegung ausführen. Nur wegen des Einfluss‘ der Schwerkraft wird er von dieser Bahn abgelenkt. Dass die Fliehkraft, die aus der Umlaufgeschwindigkeit des Planeten resultiert, die Ablenkung beeinflusst, ist Newton bewusst. Er beschreibt sie zwar⁴ qualitativ, erfasst sie aber nicht quantitativ.

Diese aus einer Geschwindigkeit resultierende Fliehkraft, die den Gegenpart zur Schwerkraft darstellt, verhindert gerade bei den Planetenbewegungen, dass die Massen ungehindert aufeinander stürzen. Die Differenz aus Schwerkraft und Fliehkraft bestimmt die Bewegungsrichtung des Planeten.

² (vgl. hierzu [U1]) hier finden sich einige Hinweise über die geschichtliche Entwicklung des Trägheitsbegriffs

³ Newton schrieb in Latein, sodass der Begriff der Schwere mit dem der Gravitation gleichgesetzt wurde

⁴ (siehe [Klo] S. 112) hier beschrieb Newton die Fliehkraft, gab aber keine Formel an.

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Nun ist aber seit Galilei⁵ bekannt, dass der Einfluss der Geschwindigkeit als ein relativer anzunehmen ist. Es ist immer die Relativgeschwindigkeit zwischen den betrachteten Objekten, die zu den zu messenden Effekten führt.

Newton führte das zu der Frage, ob der Raum als absolut anzusehen ist oder der Raum als ein relativer aufgefasst werden muss. Und er hatte auch eine Antwort: „Die Wirkungen, durch die absolute und relative Bewegungen voneinander unterschieden werden, sind Kräfte, sich von der Achse der Kreisbewegung zu entfernen“ ([Klo] S. 112). Für ihn sind also die Fliehkräfte, wenn diese bei einer Rotation entstehen, ein Kriterium zur Entscheidung für oder gegen den absoluten Raum. Er geht davon aus, dass „in einer bloß relativen Kreisbewegung“ (ebd. S. 112) keine solchen Fliehkräfte auftreten.

An dieser Stelle ist eine Überlegung erforderlich, die zeigt, wie Newton zu diesem Schluss gekommen ist.

Kurz gesagt geht Newton vom absoluten Raum aus ([New] S. 25). Alles, was sich im absoluten Raum bewegt, bewegt sich relativ zu diesem Raum. Der absolute Raum ist somit das alles Umfassende. Wenn Newton davon ausgeht, dass es in diesem Raum „Plätze“ gibt, die „von Ewigkeit zu Ewigkeit ihre gegebene Position bewahren“ ([Klo] S. 112), dann spezifiziert er solche Plätze aber nicht. Für ihn reichte der Fixsternhimmel nicht aus oder der war ihm noch zu bewegt, als dass er das Firmament als Begrenzung für den absoluten Raum heranziehen wollte.

Es liegt der Gedanke nahe, dass Newton schon damals vorschwebte, eine Unendlichkeit als Absolutum zu nehmen. Wie aber in der Unendlichkeit solche ewig unbewegten Plätze erkannt werden können, bleibt offen. Schließlich kann es in den Weiten des Universums immer noch einen unentdeckten Himmelskörper an einem „Platz“ geben, gegen den sich der Fixsternhimmel bewegt, sodass die Entscheidung, ob der Fixsternhimmel ruht, nicht zu treffen ist.

Ungeachtet dessen nimmt sich Newton des Themas der Fixsterne an. Da aber die Fixsterne scheinbar unveränderliche Positionen im Raum annehmen, verleiten sie schon dazu, sie als Beschreibung für den absoluten Raum heranzuziehen. Letztlich sind aber jegliche Bewegungen in diesem Raum zwischen den Fixsternen relative Bewegungen⁶.

So musste Newton nach einem Experiment suchen, das ohne fixe Punkte im All auskam und dennoch sowohl relative als auch absolute Bewegungen ausführen konnte. Was er fand, war das bekannte Eimerexperiment⁷.

Mit diesem Experiment konnte Newton drei Zustände hervorrufen:

- Vor dem Versuch befinden sich Eimer und Wasser in relativer Ruhe und der Wasserspiegel ist glatt
- Zu Beginn des Versuchs dreht sich zwar der Eimer, aber das Wasser wird noch nicht mitgenommen und hat die glatte Oberfläche. Die Relativbewegung zwischen Eimer und Wasser führt zu keinem Effekt.

⁵ (siehe [Gal] S. 197 ff.) hier beschrieb Galilei sein berühmtes Schiffsexperiment, in welchem er anschaulich machte, dass es nur relative Bewegungen gibt.

⁶ (siehe [Klo] S. 114) Newton sprach zwar vom Fixsternhimmel als starres Gebilde, ließ aber offen, ob es nicht auch der Fixsternhimmel sein kann, der der bewegte ist. Nach heutigem Wissen kann das nicht der Fall sein.

⁷ (vgl. [Klo] S. 112 f.) hier ist die Beschreibung des Eimerexperimentes zu finden.

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow

- Wenn dann das Wasser über die Rotation des Eimers ebenfalls rotiert, ist die Relativbewegung zwischen Wasser und Eimer wieder in Ruhe. Der Wasserspiegel verbleibt aber weiterhin in parabolischer Form (vgl. Anl. 1).

Aus diesem Versuch begründete Newton seine Erkenntnis, dass durch die Relativbewegung von Eimer und Wasser keine Fliehkräfte hervorgerufen werden und Fliehkräfte nur durch die absolute Drehung im Raum entstehen können.

Um nun von der Bewegung auf den Raum schließen zu können, stellte Newton noch das Gedankenexperiment mit den beiden Kugeln an⁸, die sich durch einen Faden verbunden in relativer Ruhe befinden (Bild 1). Wenn diese Kugeln im freien Raum und ohne jegliche weitere Objekte umeinander rotieren, ergibt sich eine Fadenspannung F_F . In gleicher Weise hatte sich das Wasser im Eimer zum Rand gezogen, als es in Rotation geriet. Bei den durch den Faden verbundenen Kugeln hat man jedoch die Möglichkeit, durch Krafteinwirkung zweier entgegen gerichteter Kräfte F_R auf beide Kugeln K_1 und K_2 eine Änderung der Drehbewegung zu erreichen. Variiert man die Richtung dieser Kräfte F_R unter Beibehaltung ihrer Beträge und ihrer Gegenläufigkeit, sowie ihrer Parallelität und der Parallelität zur Ebene E_1 , wird die Veränderung der Drehbewegung unterschiedlich ausfallen. Damit wird die Faden-Spannkraft F_F ebenfalls unterschiedlich stark beeinflusst.

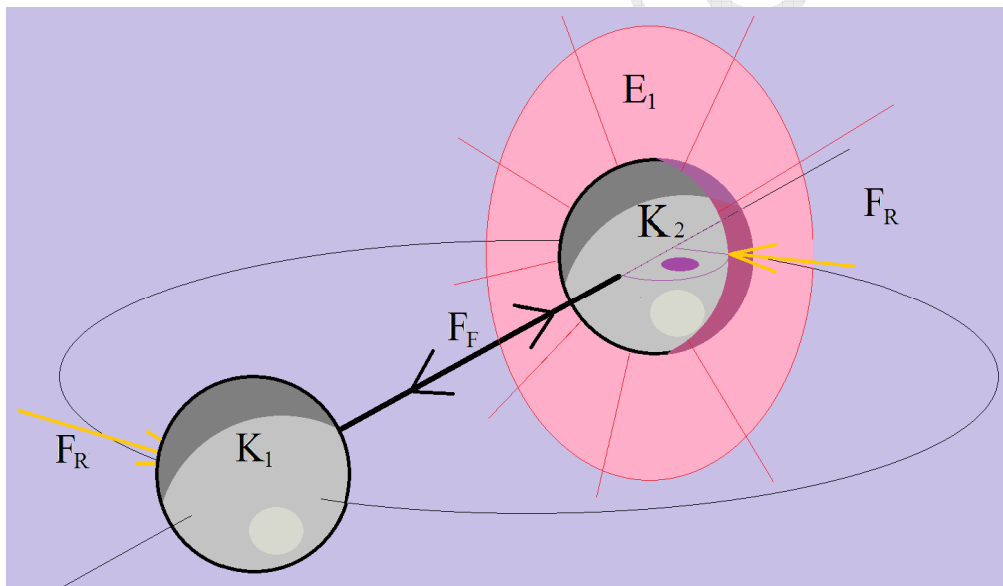


Bild 1: Newtons Gedankenexperiment mit Kugeln

Newton schloss nun unter der Maßgabe, dass nur absolute Bewegungen eine Fliehkraft erzeugen können, mit diesem Experiment die Richtung der Bewegung jeder Kugel gerade dann im Raum bestimmt ist, wenn das Maximum der Federkraft F_F erreicht ist. Damit ist die Richtung der Kugelbewegung durch jeden Experimentator ermittelbar. Das aber bedeutet, dass der Raum nicht relativ sein kann. Die Existenz des absoluten Raumes ist somit für Newton als bewiesen anzusehen.

⁸ (siehe [Klo] S. 114) hier findet sich die Beschreibung des Gedankenexperimentes mit den beiden Kugeln, die einer Fliehkraft unterliegen
Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>



Machs Fixsternhimmel

Newton hatte schon angedeutet, dass die Fixsterne eine feste Position am Sternenhimmel einnehmen. Selbst wenn das Anlass geben sollte, einen absoluten Raum mit solchen festen Punkten zu definieren, tat Newton das nur andeutungsweise und das auch nur, um letztlich darauf hinzuweisen, dass jede Bewegung zwischen einem Körper und den Fixsternen lediglich eine relative ist.

Die Frage, ob es die Erde ist oder die Fixsterne sind, die sich bewegen, ließ Newton offen. Sein Entscheidungskriterium für die absolute oder relative Bewegung war die Entstehung von Fliehkräften. Dabei hätte die Antwort für ihn doch einfach sein müssen. „Der Fixsternhimmel kann seinerseits gegen den absoluten Raum nicht rotieren, weil die zu unterstellenden Fliehkräfte ihn zerreißen würden“ ([Ble] S. 1).

Leider kannte Newton auch die Relativitätstheorie noch nicht, die die Lichtgeschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit überhaupt deklariert. Dann wäre ihm aufgefallen, dass die Fixsterne Überlichtgeschwindigkeit haben müssten, wären sie es, die sich in seinem absoluten Raum bewegten. Unterstellten wir die Rotation der Fixsterne, bräuchten wir nur deren Winkelgeschwindigkeit von 1 pro 24 Stunden mit ihrem Abstand zur Erde multiplizieren und kämen auf Überlichtgeschwindigkeiten, die sie nicht haben können.

Leider kannte er auch das Foucaultsche Pendel⁹ nicht. Dann wäre ihm klar geworden, dass es auch die Aufteilung der absoluten Geschwindigkeit zwischen den Fixsternen und der Erdrotation nicht geben kann. Es kann also nicht gesagt werden, dass sich die gemessene Geschwindigkeit der Fixsterne aus der absoluten Geschwindigkeit der Fixsterne und der dazu relativen Geschwindigkeit der Erde zusammensetzt. Wenn die Erdrotation, die vom Foucaultschen Pendel angezeigt wird, mit der Rotation gegenüber den Fixsternen exakt übereinstimmt, bedeutet es, dass es nur die Erde sein kann, die im Raum rotiert.

Selbst wenn Mach noch nicht die Relativitätstheorie kannte, so sollte er die von Maxwell herausgearbeitete konstante Lichtgeschwindigkeit kennen¹⁰.

Auch das Ergebnis des Experimentes von Foucault war ihm bekannt¹¹.

So konnte Mach zu seiner oben¹² angegebenen Aussage der Beziehung zwischen Bewegungen von Himmelskörpern und dem Fixsternhimmel kommen.

Wenn Mach aber dem Fixsternhimmel solche Bedeutung beimisst, um die Fliehkräfte zu begründen, dann deklariert er damit den absoluten Raum. Hier greift die Aussage Newtons¹³, dass aus der ewig unveränderlichen Position von Objekten der absolute Raum abzuleiten ist. Das widerspricht aber vehement Machs Intension, ausschließlich relative Bewegungen zuzulassen.

Für Mach liegt also ein direkter Widerspruch vor. Wie er diesen Widerspruch zu lösen versucht, ergibt sich aus seinen Ausführungen in [Mac] S. 216 ff. Dort setzt er sich mit „Newton's Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung“ ([Mac] S. 216) auseinander.

Wie er das versucht, ist in Kurzform im Folgenden wiedergegeben:

⁹ eine gute Beschreibung mit vielen Informationen findet sich in [Scu]

¹⁰ (siehe [Max] S. 498; Gl. 71) mit der dort angegebenen Formel wird angegeben, dass die Lichtgeschwindigkeit nur von Konstanten abhängt

¹¹ (siehe [Mac] S. 226)

¹² ([Mac] S. 232) hier ist die Aussage Machs gemeint, dass die Fliehkräfte nur bei relativen Bewegungen gegen den Fixsternhimmel entstehen

¹³ siehe S. 4, wo Newton den Fixsternen eine ewig konstante Position zuerkennt.

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



1. Mach zitiert die von Newton aufgestellten Definitionen für Raum und Zeit
2. Nun setzt sich Mach mit der absoluten Zeit Newtons auseinander. Das führt ihn zu dem Schluss, dass Bewegungsabläufe nur verglichen werden. „Die Zeit ist vielmehr eine Abstraction [sic], zu der wir durch die Veränderung der Dinge gelangen [...]“ ([Mac] S. 218). Insofern sieht Mach alle Bewegungsabläufe auch zeitlich als relativ.
3. Dann bezieht sich Mach auf die Raumdarstellung Newtons und zitiert wiederum dessen Definitionen. Mach zitiert sowohl das Eimerexperiment als auch den Gedankenversuch Newtons mit den rotierenden Kugeln.
4. Im Anschluss bemerkt Mach feststellend: „Ueber [sic] den absoluten Raum und die absolute Bewegung kann niemand etwas aussagen, sie sind bloss [sic] Gedankendinge [...]“ ([Mac] S. 223).
Das begründet er wie folgt: „Wenn wir sagen, dass ein Körper K seine Richtung und Geschwindigkeit nur durch den Einfluss eines anderen Körpers K' ändert, so können wir zu dieser Einsicht gar nicht kommen, wenn nicht andere Körper A, B, C vorhanden sind, gegen welche wir die Bewegung des Körpers K beurtheilen [sic]. Wir erkennen also eigentlich eine Beziehung des Körpers K zu A, B, C.... Wenn wir nun plötzlich von A, B, C.... absehen, [sic] und von einem Verhalten des Körpers im absoluten Raume sprechen wollten, so würden wir einen doppelten Fehler begehen. Einmal könnten wir nicht wissen, wie sich K bei Abwesenheit von A, B, C.... benehmen würde, dann aber würde uns jedes Mittel fehlen, das Benehmen des Körpers K zu beurtheilen [sic] [...]“ ([Mac] S. 224).
Hiermit begründet Mach, dass eine Feststellung von Bewegungen ausschließlich in Relation zu anderen Körpern (resp. Ereignissen) vorgenommen werden kann. Ohne solche anderen Körper im Raum kann eine Einschätzung über den Bewegungszustand nicht vorgenommen werden. Mach geht sogar so weit, dass er ausschließt, solche Einschätzung jemals anzustellen, da nun mal ausreichend andere Körper im All vorhanden sind und nicht eliminiert werden können.
5. Nun geht Mach auf die Entstehung von Fliehkräften ein. Er analysiert Newtons Eimerexperiment und überträgt es auf die Rotation der Erde. Diese wird durch die aus der Rotation gegenüber Newtons absolutem Raum festzustellenden Fliehkräfte eine Abplattung erleiden und das Foucaultsche Pendel wird einer Rotation unterliegen. Nach Newtons Meinung sollten diese Indizien der Rotation verschwinden, würde es all die anderen Himmelskörper sein, die sich um die Erde bewegen.
Abgesehen davon, dass diese Szenario auszuschließen ist¹⁴, geht Mach davon aus, dass die Rotation der Erde nicht mal absolut und dann wieder relativ sein kann. Da für ihn aber wie vor beschrieben alle Bewegungen relativ sind, konstatiert er: „[...] dass auch für Relativdrehungen Centrifugalkräfte [sic] sich ergeben“ ([Mac] S. 226).
6. Leider ist bis hierhin Mach noch nicht auf die Entstehung der Fliehkräfte zu sprechen gekommen. Er widmet sich dem Trägheitsgesetz. Also findet er in diesem Absatz eine Überleitung: „Das Verhalten der irdischen Körper gegen die Erde lässt sich auf deren Verhalten gegen die fernen Himmelskörper zurückführen“ ([Mac] S. 227).
Die Trägheit wird von Mach als das Beibehalten von „Richtung und Geschwindigkeit im Raum“ (ebd.) unter „Beachtung der ganzen Welt“ (ebd.) gesehen.

¹⁴ siehe Seite 6 (2. Absatz)

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



7. Hier benutzt Mach einen sehr eleganten Trick, um die Trägheit von Massen im Universum zu beweisen. Er konstatiert, dass die Trägheit bedeutet, dass ein Körper sowohl Richtung und Geschwindigkeit im Raum beibehält. Dann schwenkt er um und stellt fest, dass die Konstanz von Richtung und Geschwindigkeit zwingend darauf hinweist, dass der Körper keiner Beschleunigung unterliegt. Das ist formal richtig und er nutzt den Fakt, dass es ohne Beschleunigung keine Richtungs- und Geschwindigkeitsänderung gibt.

Nun weist er mit einfachen Gedanken nach, dass über Summe aller im Weltraum existierender Massen die Beschleunigung auf einen Körper null sein muss, wenn „[...] man nur hinreichend viele, hinreichend weite und grosse [sic] Massen in Betracht zieht“ (ebd. S. 228 f.).

Daraus schließt er, dass es nicht möglich ist, von den Massen des Weltalls zu abstrahieren. Es ist somit auch nicht nötig, einen absoluten Raum zu definieren, um die Trägheit von Körpern im Raum zu bestimmen.

8. Letztlich erklärt Mach, dass alle Massen „[...] zueinander in ganz gleichartigen Beschleunigungsbeziehungen stehen, und zwar kann man alle Massen als untereinander in Beziehung stehend betrachten“ (ebd. S. 230).

Er arbeitet heraus, dass die relativen Bewegungen bei den Massen in großer Entfernung linear sein müssen, weil die auf sie wirkenden Beschleunigungskräfte¹⁵ verschwinden. Die Massen bewegen sich also zwangsläufig unbeschleunigt.

Sollte aber auf eine Masse eine Beschleunigung durch einen anderen Körper¹⁶ ausgeübt werden, dann wird sich in analoger Weise auch die Bewegung des Körpers ändern. Diese so lapidare Aussage, die Mach kommentiert: „Diese Andeutung möge hier genügen“ (ebd. S. 231), soll darauf hindeuten, dass der Einfluss der kosmischen Massen in direkter Beziehung zur Bewegung eines Körpers steht. Dabei führt die Summe aller Massen im Kosmos zur Aufhebung des gegenseitigen Einflusses auf einen betrachteten Körper.

9. Im letzten Punkt seiner Analyse wertet Mach lediglich die Erkenntnisse aus. Er kommt zu der Einsicht, dass seine Auffassung des relativen Raumes, in dem nur relative Bewegungen registriert werden können, bezüglich der Trägheit genau dasselbe Ergebnis wie Newtons absoluter Raum hat. Damit erklärt er die Trägheit und sagt, warum seine These nicht nachzuweisen ist. Es gibt keine Möglichkeit, die Fixsterne aus dem All zu entfernen. Damit kann eine experimentelle Überprüfung der angestellten Theorien nicht erfolgen.

Hat Mach mit dieser Analyse der newtonschen Definitionen und der Gegenüberstellung seiner eigenen Vorstellungen die Wechselwirkung des Fixsternhimmels auf die Fliehkräfte erklärt?

Die Antwort lautet hier eher: ‚nein‘. Wenn er aber das nicht erreicht hat, was hat er dann bewiesen? Und wo liegt der Grund dafür, dass sein Ergebnis so fragwürdig ist?

Letztlich ist die heutige Wissenschaft nicht überzeugt¹⁷, dass das machsche Paradoxon als gelöst zu bezeichnen ist.

¹⁵ siehe Punkt 7, wo gezeigt wird, dass die Summe aller Gravitationskräfte, die von großen Massen in großer Entfernung ausgehen, zu null wird.

¹⁶ dieser Körper befindet sich dann offensichtlich in der Nähe, sodass es durch die Gravitation eine gegenseitige Beeinflussung gibt

¹⁷ siehe Einführung S. 2; 2. Ansatz

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Die Problemerkörterung

Newton erkannte¹⁸, dass zur Beschreibung der Planetenbewegungen und aller Bewegungen im Kosmos, die Frage nach der Auffassung von Raum, Zeit und Bewegung eine kardinale Rolle bei der Beschreibung der Bewegungsabläufe spielt.

Dabei war die Vorstellung, dass ein Körper zu jedem Zeitpunkt einen fest bestimmbar Punkt im Raum einnimmt, vorherrschend. Es war für das Verständnis des Raumes am einfachsten, dem Raum im Geiste ein Koordinatensystem zuzuordnen, sodass die Position eines jeden Körpers direkt zu bestimmen war. Bewegungen waren absolut zu verfolgen.

Aber mit der Erkenntnis, dass es gerade die Bewegungen sind, die von anderen Körpern abhängen, musste Newton umdenken und diese Bewegungen direkt auf solche beeinflussenden Körper beziehen. Damit kam er nicht umhin, auch relative Beziehungen anzuerkennen.

Seine Lösung des Problems war, dass er Räume definierte, die relativ zueinander in Beziehung standen. Deren Beziehungen aber bezogen sich auf einen größeren Raum, der die relativen Räume umfasste. Dass der so aufgefasste absolute Raum selbst nur ein relativer Raum in einem größeren System sein konnte, führte zu einer ewigen Fortsetzung.

Letztlich musste es aber einen Raum geben, der zumindest für die Beobachter auf der Erde als der absolute Raum zu fassen war, in dem sich für die Erdenbewohner alle Bewegungen abspielten. Um diesen absoluten Raum nachzuweisen, führte Newton sein Eimerexperiment durch. Dass sich in diesem Experiment die Wasseroberfläche nur dann parabolisch (siehe Anl. 1) formte, wenn das Wasser gegen das Firmament rotierte, war für Newton Beweis für den uns umgebenden absoluten Raum. Die bloße Rotation des Eimers gegen das Wasser führte eben nicht zu einer Krümmung der Wasseroberfläche.

Dieser Gedanke des letztendlich größten absoluten Raumes gefiel Mach nicht. Er wollte zwingend vom absoluten Raum absehen. Grundlage dafür mochte für ihn die Tatsache gewesen sein, dass grundsätzlich nur relative Bewegungen zu registrieren sind.

Aber hat Mach nicht dadurch, dass er den Fixsternhimmel als Bezug zur Entstehung von Fliehkräften heranzog, den absoluten Raum deklariert? Handelt es sich beim Firmament nicht um dieselbe Raumbeschreibung, wie sie Newton nutzte? Nur war Newton sogar noch weitsichtiger. Er gab dieser Raumbeschreibung noch die Möglichkeit, selbst wieder relatives Stück eines größeren Raumes zu sein.

Wie erklärte Mach das newtonsche Eimerexperiment? Wie konnte er bei ein und demselben Eimerexperiment zu einer völlig konträren Interpretation gelangen?

Mach beharrte auf einer die Bewegungen vereinheitlichenden Meinung, indem er sagte: „[...] ich kann darin einen Unterschied zwischen Rotation und Translation nicht machen“ ([Mac] S. 232). Auf die gedachte Frage, wie sich bei einer eventuellen relativen Rotation des Fixsternhimmels um den Wassereimer der Wasserspiegel verhalten würde, antwortet er: „Der Versuch ist nicht ausführbar, der Gedanke überhaupt sinnlos, da beide Fälle sinnlich voneinander nicht zu unterscheiden sind“ [ebd. S. 233]. Und bezogen auf das Eimerexperiment überlegt er, dass bei ausreichend schwerer Ausführung des Eimers¹⁹ der

¹⁸ sicherlich auch mit der Kenntnis der von Galilei beschriebenen relativen Bewegung

¹⁹ Mach geht an dieser Stelle von einer entsprechend dicken Ausführung der Eimerwandung aus, was physikalisch zum selben Einfluss auf das Wasser führen würde.

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Eimer selbst als Fixsternhimmel fungieren könnte und zur Krümmung der Wasseroberfläche führen könnte. Er relativiert Newtons Eimerexperiment, „[...] dass die Relativdrehung des Wassers gegen die Gefäßwände [sic] keine merklichen Centrifugalkräfte [sic] 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 [sic] immer dicker und massiger, zuletzt mehrere Meilen dick würde“ ([Mac] S. 226 f.)

Wie stellt sich unter diesen beschriebenen Aspekten das Problem mit der Entstehung von Fliehkräften dar und welche Begründungen können erbracht werden, dass die Interpretation von Ernst Mach die alleinig richtige ist?

Das erklärte Ziel Newtons war es, mittels der Fliehkräfte einer rotierenden Flüssigkeit²⁰ die Rotation bezüglich des absoluten Raums festzustellen. Durch die Ermittlung der Änderung der Fliehkräfte eines rotierenden Körpers²¹ durch Einbringung von definierten Kräften sollte dann die Translation des Körpers im absoluten Raum bestimmt werden.

Dass nun Mach allen Grund hatte, hier gedanklich einzugreifen, erklärt sich aus der Frage nach dem Raum. Raum und Zeit sollten für ihn nur relativ sein. Die kardinale Frage, ob diese Welt eine absolute oder doch nur eine relative ist, beschäftigt auch heute noch die Wissenschaft.

Die Relativität der Zeit erklärte Mach durch die Negation der Zeit²². Er erklärte die Zeit aus den Bewegungen und diese werden ausschließlich relativ wahrgenommen.

Beim Raum setzte Mach ebenfalls auf die Relativbewegungen. Dabei ging er von der relativen Bewegung der Fixsterne aus und weist nach, dass trotz der schier unendlich vielen Fixsterne auf einen Körper keine Wechselwirkungen aus deren Massenanziehungen abzuleiten ist. Daraus schließt er, dass dieser betrachtete Körper seinen Bewegungszustand beibehält und somit ausschließlich seiner Trägheit folgt.

Das Argument, dass ohne all diese Fixsterne auf den Körper K ebenso keine gavitativen Kräfte wirken würden und sich der Körper K träge bewegen würde, wehrte Mach mit der Begründung ab, dass „[...] wir nicht wissen [könnten], wie sich K bei Abwesenheit von A, B, C.... benehmen würde [...]“²³ ([Mac] S. 224). Er sagte damit schlicht, dass wir nicht alle Körper des Universums entfernen können, um das Verhalten eines einzelnen Körpers zu betrachten. Das heißt so viel, dass in diesem Fall der Existenz nur eines Körpers im All unklar bleibt, ob die Bewegung dieses Körpers träge (also gleichförmig, geradlinig) verlief, selbst wenn keine Kräfte auf ihm wirkten. Ebenso wäre es unmöglich, festzustellen, ob in solch einem Falle Fliehkräfte auftreten könnten. „Das Weltsystem ist uns nicht zweimal gegeben mit ruhender und mit rotirender [sic] Erde, sondern nur einmal mit seinen allein bestimmbaren Relativbewegungen“ (ebd. S. 226). Und Mach schlussfolgert pragmatisch, dass wegen der Relativbewegung auch bei einer ruhenden Erde, um die sich der Fixsternhimmel bewegt, die Zentrifugalkräfte ergeben müssten²⁴.

²⁰ hier ist das Eimerexperiment aussagekräftig ([New] S. 112)

²¹ oder auch eines Systems von Körpern, die miteinander verbunden sind und somit als ein Objekt betrachtet werden können (vgl. das Kugelexperiment [New] S. 114)

²² siehe Zitat auf Seite 7 (Unterpunkt2)

²³ es ist die Rede davon, dass die Relativbewegung des Körpers K nur gegen andere Körper A, B, C usw. bewertet werden kann

²⁴ vgl. hierzu das Zitat [Mac] S. 226 (nachzulesen S. 7 Unterpunkt 5 letzter Satz)

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022 <https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>

Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Letztendlich konstatiert Mach aber selbst, dass „[...] wir des absoluten Raumes nicht habhaft werden [können] [...]“ ([Mac] S. 231). Das bedeutet, dass die Erkenntnisse Machs sicherlich sehr interessant sind, sie aber vorerst durch keinen Versuch verifiziert werden können.

die Trägheit in der SRT

So steht denn die Frage, wie die Charakteristik des Raumes nachgewiesen werden kann. Ist der Raum relativ oder absolut?

Benutzte Newton sein Eimerexperiment, um den absoluten Raum zu beweisen, hielt Mach dagegen und behauptete, dass der Raum nur relativ sein kann. Mit diesem Widerspruch wurde der Entstehung von Trägheitskräften bei der Rotation die Fähigkeit abgesprochen, Beweis oder Gegenbeweis für den absoluten Raum zu sein.

Bedeutet das, dass die Entscheidung für oder wider den absoluten Raum grundsätzlich nicht zu treffen ist?

Für Translationen ist die Antwort schnell gegeben. Bei Bewegungen im Raum, die linear verlaufen, ist jedwede Betrachtung von Körpern eine relative. Bewegungen, die von einem Betrachtersystem in ein anderes umgerechnet werden, sind unabhängig von der eigenen Bewegung des Beobachters gegen einen angenommenen absoluten Raum. Für seine Beobachtung ist grundsätzlich nur die Relativgeschwindigkeit zum beobachteten Objekt ausschlaggebend.

Diese Einstellung ändert sich bei der Betrachtung von Rotationen. Bei Drehungen von Objekten sind Bewegungen nicht mehr linear. Im Rahmen der SRT sind aber ausschließlich lineare Beziehungen zwischen Bewegungen zugelassen (vgl. [Emb] Abschnitt: Linearität). Diese Linearität ist durch die Einwirkung von Kräften nicht mehr gegeben. Selbst bei geradlinig aber beschleunigten Bewegungen ist die Möglichkeit gegeben, dass ein Beobachter, der sich nicht in gleicher Richtung bewegt, einen Kurvenverlauf des Beschleunigten bemerkt. „Die Gleichungen müssen linear sein. Gäbe es zum Beispiel quadratische Terme [in den Bewegungsgleichungen], dann würden Ableitungen nach Ort und Zeit von Ort oder Zeit selbst abhängen. Physikalischen [sic] Gesetze, die Ableitungen enthalten, wären dann vom Nullpunkt des Orts- und Zeitmasstabes [sic] abhängig. Das darf aber wegen der Homogenität des Raumes nicht sein“ ([Str] S. 9).

Insofern gilt für Rotationsbewegungen insbesondere, dass die für die SRT so wichtige Linearitätsbedingung nicht mehr einzuhalten ist.

Das ist dann wohl auch der Grund, warum zwischen der SRT und der ART streng zu unterscheiden ist. Daran ändert auch die Auffassung nichts, dass die Gleichungen der SRT als ein Grenzfall der ART betrachtet werden können.

Ohne auf dieses Korrespondenzprinzip einzugehen (vgl. [Gro] S. 23), sei hier festgestellt, dass die SRT, wenn sie denn als Grenzfall der ART betrachtet werden soll, gerade der Fall ist,



bei dem keine Kraftwirkungen zu einer Bewegungsänderung führen darf. Es sollte einleuchten, dass es für jede beschleunigte Bewegung zumindest einen Beobachter geben kann, der aus seinem IS diese Bewegung dann als nichtlineare Bewegung wahrnehmen wird. Die oben angegebenen Forderung nach der Linearität in der SRT wäre damit nicht erfüllt.

Die Unterscheidung von SRT und ART dokumentiert sich auch in der Geometrie des Raumes. Während im Rahmen der ART durch die im Raum befindlichen Massen mit ihrer Schwerkraftwirkung, der Gravitation, der Raum eine Krümmung erfährt, ist im Rahmen der SRT streng vom euklidischen Raum auszugehen.

Unabhängig davon, dass man im Extremfall durch Weglassen von immer mehr Massen im Raum letztlich zum euklidischen Raum kommt, unterscheiden sich die beiden Räume in einem Charakteristikum.

Dem leeren Raum, in welchem sämtliche Bewegungen linear und ohne Einfluss von Kräften vonstattengehen, ist die Qualität ‚relativ‘ zuzuordnen. Sämtliche Bewegungen können ausschließlich in Bezug zu etwas dargestellt werden. Einen absoluten Ruhepunkt zu finden, ist unmöglich.

Dementgegen ist dem mit Massen gefüllte Raum durch die Schwerkraft dieser Massen eine Eindeutigkeit gegeben. Jeder Punkt des Raumes ist absolut durch die Zuordnung der am Ort des Punktes wirkenden Schwerkraft festgelegt. Letztendlich ist der absolute Raum durch den Fixsternhimmel bestimmt.

Ob kleinen Bereichen des massebeladenen Raumes euklidische Eigenschaften zukommen, wenn ein Beobachter sich schwerelos in diesem Bereich aufhält, wäre noch zu untersuchen.

Die Diskrepanz zwischen der ART und der SRT ist somit nicht nur eine quantitative bezüglich der Schwerkraft, sondern ebenso eine qualitative hinsichtlich der Eigenschaften des Raumes.

Wie schön wäre es, wenn der Raum nicht als Existenzform der Materie (siehe [Scü] S. 745) aufgefasst würde. Ein Raum ohne jedwede Eigenschaft, der nur als ein leeres Gebilde Platz für die Materie darstellte, könnte weder relativ noch absolut sein. Diese Begriffe würden sich dann ausschließlich auf die Bewegungen der Materie beziehen.

Mit der Rotation verlässt man also per se den Bereich der SRT.

Während Krafteinwirkungen in geradliniger Richtung nur aus der Geschwindigkeitsdifferenz der wechselwirkenden Massen resultieren können (vgl. [Syd] S. 28), sind Rotationen völlig unabhängig von der Relativgeschwindigkeit eines Beobachters (vgl. [Syd] S. 29). Die Annahme, dass sich ein Beobachter um das Rotationszentrum herum bewegt und so eine Relativbewegung zum rotierenden Objekt stattfindet, entfernt sich wesentlich von der Vorstellung, dass sich in der SRT die Beobachter in IS befinden müssen und damit geradlinig bewegen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Worum ging es in diesem Artikel?

Einerseits wurde der Streit um den Charakter des Raumes aufgewärmt. Ist der Raum als ein absoluter, mit festen Koordinaten versehener anzusehen oder ist der Raum in dieser Weise nicht erfassbar und als relativer Raum zu deklarieren?

Andererseits wurde versucht, Mittel zu finden, mit denen man einer Entscheidung für oder wider die Raumfrage näher kommen kann.

Interessant zu sehen ist, dass weder Newton noch Mach zum Nachweis ihrer jeweiligen Thesen eine Translationsbewegung heranzogen. Der Grund dafür sollte sein, dass offensichtlich bei Translationsbewegungen ausschließlich die Relativgeschwindigkeit für eine Wechselwirkung zwischen Objekten verantwortlich ist (siehe S. 11). Diese einfache Erkenntnis ist die Grundlage der SRT.

Ebenso interessant ist es, dass Newton und Mach bei der Interpretation ein und desselben Eimerexperimentes zu völlig anderen Ergebnissen kommen. Während für Newton die Schlussfolgerung aus seinem Eimerexperiment der absolute Raum ist, hält Mach an der Relativität des Raumes fest.

Das beim Eimerexperiment auszuwertende Kriterium ist die Trägheit. Hier konstatiert Newton über die 3 Phasen seines Experimentes, dass durch die Trägheit des Wassers unabhängig von der Relativbewegung des Wassers zum Eimer die Wasseroberfläche gekrümmt wird (vgl. Anl. 1). Von dieser Unabhängigkeit schloss Newton auf den absoluten Raum.

Mach hingegen stellte den Zusammenhang der Trägheit des Wassers mit der Relativbewegung zum Fixsternhimmel her und deklarierte davon abgeleitet den relativen Raum.

Es stellt sich also die Frage nach der Ursache der Trägheit. Nur wenn die Ursache der Trägheit bekannt ist, ist der Schluss von einer Trägheit auf den Charakter des Raumes zulässig. Und dass die Relativbewegung zweier Objekte nicht die Ursache der Trägheit sein sollte, zeigen die unterschiedlichen Interpretationen von Newton und Mach.

Was ist nun die Trägheit?

Wenn sich ein Objekt, ein Körper, eine Masse nach dem 1. newtonischen Gesetz geradlinig, gleichförmig bewegt, ist weder im relativen noch im absoluten Raum dem Objekt eine Trägheit zuzuordnen. Die Behauptung, dass diese geradlinige und gleichförmige Bewegung der Trägheit des Objektes geschuldet ist, führt in die Irre, da die Trägheit dieses Objektes solange nicht zu ermitteln ist, solange es nicht beschleunigt wird. Des Objektes Trägheit offenbart sich grundsätzlich erst in einem Beschleunigungsprozess. Nur durch eine Kraft wird die träge Masse beschleunigt und der Betrag der Masse ist bestimmbar.

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>
Revision: 1.2.2.4 vom 05.11.2024
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Die Trägheit gibt sich also nur bei einer Kraftwirkung zu erkennen. Die Kraftwirkung erfordert aber einen Energieeintrag. Der Wechselwirkungsprozess des Energieeintrags funktioniert aber nicht instantan, sondern er ist ein zeitabhängiger Prozess. Letztlich ist die Ursache der Trägheit in der Energieerhaltung während des gesamten Energieübertragungsprozesses zu suchen (vgl. [Syd]).

Wenn also die Trägheit als Effekt der Energieerhaltung (siehe [Syd] S. 28) aufzufassen ist, ist die Frage nach dem Zusammenhang der Trägheit mit der Relativbewegung neu zu überdenken.

Bei der translatorischen (siehe [Syd] S. 3) Trägheit scheint die Sache einfach zu sein. Ein Energieübertragungsprozess, der die Richtung und/oder Geschwindigkeit einer Masse ändert, indem kurzzeitig Energie von außen auf die Masse einwirkt, ist primär von der Relativgeschwindigkeit des Energieträgers zur Masse abhängig. Die Relativität des Raumes ist logische Endkonsequenz. Darin sollten sich auch die Physiker soweit einig sein.

Problematisch wird es bei der Rotation. Dadurch, dass während der Rotation einer Masse um einen Drehpunkt die Trägheit auch ohne äußere Energiezufuhr erhalten bleibt, fällt es schwer, an den Trägheitseffekt aus Energieerhaltung zu glauben.

Führt man aber die Rotation auf eine kontinuierliche Richtungsänderung mit gleichbleibender Tangentialgeschwindigkeit (siehe [Syd] S. 22) zurück, ist der Ansatz der translatorischen Trägheit mit einer Richtungsänderung auf diesen Fall übertragbar.

Zur Interpretation der Rotationsgeschwindigkeit muss allerdings gesagt werden, dass sich unabhängig von Bewegungen beliebiger anderen Massen das betrachtete, rotierende Objekt um einen Drehpunkt bewegt. Dieser Drehpunkt ist vom Objekt aus zu jedem Zeitpunkt auffindbar. Damit befindet sich das betrachtete Objekt in seinem eigenen absoluten Raum. Für das Objekt gibt es einen festen Bezugspunkt.

Daraus ist nicht zwingend der absolute Raum anzuleiten. Newtons Schlussfolgerung stimmt eben nur lokal und für diejenigen, die sich auf diesen Drehpunkt beziehen. Der aber bewegt sich seinerseits relativ zu anderen Punkten des Raumes. Damit ist das rotierende System im Raum nur als relatives zu betrachten.

Hätte Newton die Möglichkeit gehabt, Einspruch zu Machs relativer Welt zu erheben, hätte er vielleicht angeführt, dass bei einer Relativbewegung der Fixsterne um einen Beobachter, diese wiederum auf einen Drehpunkt hinweisen würden, der zumindest für den Fixsternhimmel zur absoluten Betrachtung des von den Fixsternen eingeschlossenen Raumes führen würde. Dass dieser Drehpunkt dann mit dem Ort des Beobachters übereinstimmen muss, wäre nicht nachzuweisen. Für jeden Beobachter würde er ja aus der Relativbewegung der Fixsterne auf seinen Ort als den Drehpunkt des Firmamentes schließen.

Die sich stellende Frage ist die nach dem machschen Prinzip (vgl. [Mac] S. 232, siehe S. 2). Ist die Rotation eines Objektes zu registrieren, wenn es keinen Fixsternhimmel gibt?

Sollte es entgegen den realen Möglichkeiten (siehe [Mac] S. 233) mittels Gedankenexperiment gelingen, die Fixsterne aus dem Raum zu verbannen, könnte man dann im leeren Raum nachweisen, dass die Rotation eines Körpers nach Mach zu keiner Trägheit führt? Oder würde die Trägheit entsprechend der Vorstellung Newtons durch die entstehenden inneren Kräfte allemal messbar sein?

Die Umstände zur Durchführung eines praktischen Versuchs herzurichten, ist ein unmögliches Unterfangen. Wie bereits Mach erwähnte, ist ein solcher „[...] Versuch [...] nicht ausführbar“ ([Mac] S. 233). Es bleibt nur die Möglichkeit einer Erklärung auf rein theoretischer Ebene.

Dazu stelle man sich einen leeren Raum vor. Hier ist es unerheblich, ob dieser Raum relativ oder absolut ist. Er sei völlig (!) leer. Man könnte sagen, es sei gar kein Raum.

Dann füge man im Geiste diesem Raum einen einzigen Körper hinzu. Dieser Körper ist im Bild 2 die Erde. Von der Erde wird ein Sputnik in Ermangelung einer Trägerrakete mittels Katapult in den Orbit geschossen. Damit das funktioniert, ist davon auszugehen, dass die Erde, die hier als der zu untersuchende Körper herhält, keine Schwerkraft entfaltet.

Die Schussrichtung ist senkrecht nach oben. Damit befindet sich der Sputnik nach Verlassen des Katapults direkt im freien Raum und schwebt mangels der unterstellten, fehlenden Schwerkraft der Erde schwerelos dahin.

Unabhängig von der möglichen Beschaffenheit des Raums (ob also relativ oder absolut), wird sich der Sputnik auf einer Geraden bewegen (siehe Bild 2: rote Linie). Mögliche Beeinflussungen der Geradlinigkeit dieser Bewegung durch Schwerkkräfte sind per Definition ausgeschlossen, sodass die Gültigkeit der Voraussetzung der SRT erfüllt ist. Die Geradlinigkeit der Sputnik-Bewegung folgt ausschließlich der Erhaltung der kinetischen Energie des Sputniks.



Bild 2: Bewegung aus der Corioliskraft resultierend (Erde von google Earth)

Dass sich die Erde während der Sputnik-Bewegung weiter dreht ist für den aufgeklärten Beobachter nichts Ungewöhnliches. Diese Rotationsbewegung ist durch den schwarzen Pfeil angedeutet. Auch ist mittels der schwarzen Senkrechte gezeigt, dass die Sputnik-Richtung



nicht mit der Abschussrichtung des Sputniks übereinstimmt. Auch hier wirkt die Rotation der Erde mit hinein.

Für den sich mitdrehenden Beobachter am Katapult auf der Erde erscheint allerdings die Bewegung des Satelliten eine Kurve zu sein. Diese Kurve könnte so aussehen, wie sie im Bild 2 durch die gelbe Kurve angedeutet wurde. Als Ursache für diese Kurvenbewegung wird aus der Sicht des Erdenbeobachters die Corioliskraft verantwortlich gemacht. Dass die Corioliskraft eine Scheinkraft sein muss, wird nun klar.

Auf den Sputnik wirkt keinerlei Kraft. Der Sputnik behält nur deshalb seine kinetische Energie bei, weil auf ihn keine Kraft wirkt. Damit kann seine Bewegung als Gerade angenommen werden. Aus der Beobachtung der relativen Kurvenbewegung, die der Erdenbeobachter wahrnimmt, ist dann eindeutig die Rotationsbewegung der Erde abzuleiten.

Der logische Schluss ist also nicht der, dass die gerade Bewegung des Sputniks zu messen ist und damit auf eine Geometrie des Raumes geschlossen werden kann, sondern es die Kurvenbahn des Sputniks ist, die zur Erkenntnis der Drehbewegung der Erde führt.

Es lässt sich sicherlich sagen, dass sich mit dem Foucaultschen Pendel dieselbe Erkenntnis ableiten ließe. Es ist aber hier nicht nötig, dass der Fixsternhimmel als relative Orientierung für diese Drehung herangezogen werden muss. Die Fixsterne fehlen im Bild 2. Sie haben keinen Einfluss auf die Interpretation der Rotation der Erde.

Einzigster Anhaltspunkt für die Drehung ist die Feststellung der Kurvenbewegung des Sputniks aus Sicht der Erde. Ja, unterscheiden zu können, ob eine Bewegung gerade oder gekrümmt ist, ist die Voraussetzung für diese Erkenntnis.

Damit löst sich das Machsche Paradoxon auf und ist nur eine einfache Frage nach der Energieerhaltung. Bleibt die kinetische Energie eines bewegten Körpers konstant, ist seine Bewegung geradlinig und gleichförmig. Erkennt ein Beobachter diese geradlinige Bahn als gekrümmte Kurve, befindet er sich selbst in Rotation.

Damit sind aber die aus der Rotation resultierenden Fliehkräfte ebenfalls unabhängig von irgendeinem Einfluss der Fixsterne. Mit dieser Unabhängigkeit von den Fixsternen existieren die Fliehkräfte natürlich auch dann, wenn es keine Fixsterne gibt. Rotierende Systeme haben einen absoluten Charakter, da der Drehpunkt ein ausgezeichnete Punkt, ein spezieller Punkt in Relation zum System ist. Dem Gedanken, dass rotierende Systeme sich in ihrer Gänze relativ zu anderen Systemen bewegen, steht nichts entgegen.

Bei seinem Eimerexperiment (siehe [New] S. 112 und s. S.4) beschreibt Newton, dass durch die Drehung des Eimers das darin enthaltene Wasser „[...] an den Wänden des Gefäßes hinauf [...]“ ([New] S. 113) steigt.

Zu diesem Zweck wird ein einzelnes Wassermolekül betrachtet. Die auf dieses Molekül wirkenden Kräfte, die während der Rotation des Wassers auf das Molekül wirken, sind im folgenden Bild A1.1 dargestellt:

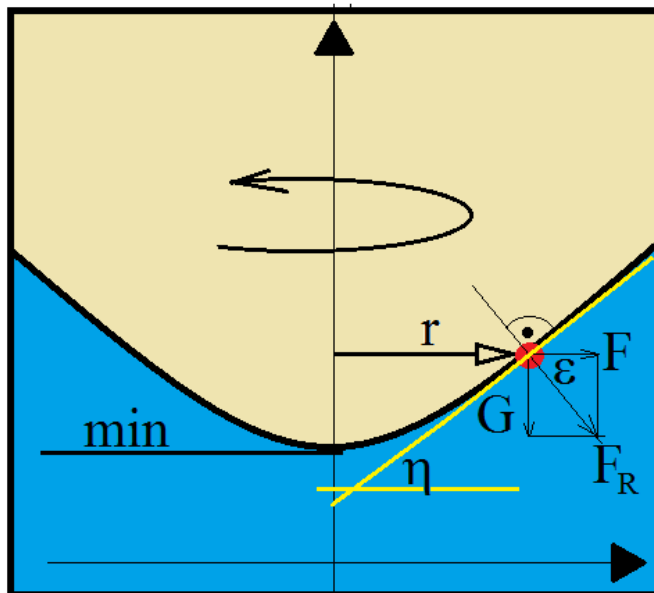


Bild A1.1: Kräfteparallelogramm eines Wassermoleküls (vgl. [Mes] S. 197)

Es wirkt das Gewicht G des Wassermoleküls mit seiner Masse m durch die Fallbeschleunigung g immer in senkrechter Richtung:

Des Weiteren wirkt die Fliehkraft F auf das Wassermolekül. Diese Kraft ist gekennzeichnet durch die Drehgeschwindigkeit ω des Wassers, den Abstand r von der Rotationsachse und der Masse des Wassermoleküls selbst:

Durch diese beiden wirkenden Kräfte ergibt sich die Resultierende F_R deren Richtung durch die Gleichung Gl. A1.3 gegeben ist:

Quellenangabe: Sydow, R. Das machsche Paradoxon, Hypothese oder Realität? Niederfinow (Deutschland) 24.11.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-das-machsche-paradoxon>



Diese Wirkungsrichtung steht senkrecht auf der sich auszubildenden Wasseroberfläche. Die Wasseroberfläche habe an der Stelle des betrachteten Wassermoleküls den Anstieg η .

Der Anstieg η lässt sich nun einfach darstellen durch:

$$\tan(\eta) = \tan(90 - \varepsilon) = \frac{1}{\tan(\varepsilon)} \quad (\text{vgl. [Göh] S. 12}) \quad \text{Gl. A1.4}$$

Es folgt wegen Gleichung Gl. A1.3:

$$\tan(\eta) = \frac{F}{G} \quad \text{Gl. A1.5}$$

Damit ist es nun einfach, aus dem Anstieg der Funktion der Wasseroberfläche durch Integration des Anstiegs auf die Funktion selbst zu schließen.

$$f(r) = \int \tan(\eta) \, dr \quad \text{Gl. A1.6}$$

Es folgt durch Einsetzen der obigen Beziehung nach Gleichung Gl. A1.5:

$$f(r) = \int \frac{F}{G} \, dr = \int \frac{m\omega^2 r}{mg} \, dr \quad \text{Gl. A1.7}$$

Es folgt in einfacher Rechnung:

$$f(r) = \frac{\omega^2}{2g} r^2 + \text{min} \quad \text{Gl. A1.8}$$

Dass die Integrationskonstante gerade dem Minimalstand min des Wassers entspricht, resultiert aus der Überlegung, dass für $r = 0$ an der Rotationsachse sich gerade der Minimalstand einstellen wird.

Damit ist die Funktion $f(r)$ für den Wasserstand im rotierenden Eimer berechnet.



Literatur

- [Ble] Bleyer, U.; Liebscher, D.-E.: vom Newtonschen Eimerversuch zur Quantentheorie des Universums, das Machsche Prinzip
google Potsdam cited 05.01.2012
<http://www.aip.de/~lie/Publicationen/257.Eimerversuch.pdf>
- [Emb] Embacher, F.: Spezielle Relativitätstheorie
metager Wien (Österreich) cited 04.12.2008
<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT>
- [Gal] Galilei, G.: Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische
B. G. Teubner Leipzig (1891) cited 26.02.2022
<https://ia802801.us.archive.org/13/items/dialogberdiebe00galuioft/dialogberdiebe00galuioft.pdf>
- [Göh] Göhler, W.: Höhere Mathematik, Formeln und Hinweise
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 4. Aufl. 1974
- [Gro] Große, N.: Allgemeine Relativitätstheorie, WS 2018/19
Universität Freiburg Freiburg (02.06.2019) cited 17.11.2022
https://home.mathematik.uni-freiburg.de/ngrosse/teaching/Vorlesungen/ART_WS1819_Skript.pdf
- [Klo] Klostermann (Hrsg.): Isaak Newton, Über die Gravitation...
Vittorio Klostermann GmbH Frankfurt / M. 1988
- [Mac] Mach, E.: Die Mechanik in Ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt
F. A. Brockhaus Leipzig 3. Aufl. (1897) cited 09.07.2017
<https://archive.org/details/diemechanikinih05machgoog>
- [Max] Maxwell, J. C.: A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field
Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155 (1865) 459-512 London (England)
(01.01.1865) cited 09.02.2022
<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1865.0008>
- [Mes] Meschede, D.: Gerthsen Physik
Springer Verlag Heidelberg 24. Aufl. (2010) cited 26.02.2012
<http://www.springerlink.com/content/978-3-642-12894-3#section=782231&page=1&locus=6>
- [New] Newton, I.; Wolfers, J. Ph. (Hrsg.): Mathematische Principien der Naturlehre
Verlag von Robert Oppenheim Berlin (1872) cited 10.05.2022
<https://books.googleusercontent.com/books>
- [Scu] Schult, A.: Das Foucaultsche Pendel
Ludwig-Maximilians-Universität München München cited 12.05.2022
https://www.geophysik.uni-muenchen.de/outreach/foucault-pendulum/das-foucaultsche-pendel?set_language=de
- [Scü] Schütz, G. et al.: Kleines politisches Wörterbuch
Dietz Verlag Berlin 3. Aufl. 1978
- [Syd] Sydow, R. Trägheit, am Beispiel des elastischen Stoßes Niederfinow (Deutschland) 01.09.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#mechanik-tragheit>



- [Str] Straumann, U.: Relativitätstheorie, Ergänzendes Scriptum zur Vorlesung Physik II
Physik - Institut Universität Zürich Zürich (19.03.2013) cited 25.10.2015
<http://www.physik.uzh.ch/>
- [U1] unbekannt: Trägheit
wikipedia unbekannt (20.02.2022) cited 07.05.2022
https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A4gheit#cite_ref-7