1 EINLEITUNG

Das Thema dieser Arbeit ist Isaac Newtons (1643–1727) absoluter Raum und die Kritik dieser Konzeption durch Immanuel Kant (1724–1804) und Jakob Friedrich Fries (1773–1843). Kants Transformation des absoluten Raumes bildet einen Schwerpunkt der Kantforschung der letzten Jahre, wohingegen der Philosoph, Physiker und Mathematiker Fries noch nicht die nötige Aufmerksamkeit erhalten hat. Dies gilt insbesondere für seine Kritik des newtonschen Raumes. Da die friessche Naturphilosophie in den letzten Jahrzehnten eine Renaissance erfährt, schlägt diese Untersuchung eine Brücke zwischen den sich entwickelnden Forschungsbereichen und erweitert die aktuelle Debatte.

Die Diskussionen um Newtons absoluten Raum sind so alt wie die *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*[1] (1687) selbst. Dabei dominiert im achtzehnten und in der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts eine philosophische Kritik, die mit Verzögerung ein naturwissenschaftliches Echo findet. Spätestens seit der speziellen Relativitätstheorie gilt die Vorstellung eines absoluten Bezugssystems als überholt.

Für den Wissenschaftstheoretiker und -historiker liegt das Interesse an der Theorie des absoluten Raums und seiner Kritik durch Kant deshalb auf der Hand: Auf der einen Seite ist die klassische Mechanik das Paradebeispiel einer wissenschaftlichen Disziplin, zu deren Entwicklung und Etablierung Newton wesentlich beigetragen hat. Auf der anderen Seite ist Kant einer der prominentesten und einflussreichsten Kritiker des newtonschen Raumes. Hinzu kommt jedoch eine thematische Eigenart dieser Konzeption, die in ihrer weitreichenden Konsequenz noch nicht ausreichend durch die Forschung erschlossen wurde, ja zum Teil absichtlich vernachlässigt wird: die Vielschichtigkeit der Raumfrage. Newton entwirft seine Raumkonzeption im Spannungsfeld von physikalischen, philosophischen, mathematischen und theologischen Debatten. Ein Verdienst der Debatten im achtzehnten und neunzehnten Jahrhundert um die Grundlagen der Mechanik ist

1 Newtons Philosophiae Naturalis Principia Mathematica wird im Folgenden als Principia abgekürzt. Im Falle von eingerückten Zitaten wird sie nach der Übersetzung von Cohen und Whitman zitiert. Es handelt sich bei ihr um die adäquateste verfügbare Übertragung ins Englische. Mit ihrem Erscheinen verdrängte sie die Übersetzung durch De Motte aus dem Jahr 1729 und wird im Allgemeinen in der aktuellen Newtonforschung verwendet. Um sprachliche Kontinuität zu gewährleisten, wird im Fließtext auf die deutsche Übersetzung von Schüller zurückgegriffen. Diese zeichnet sich gegenüber der Ausgabe von Cohen und Whitman durch ihren philologischen Anspruch aus und orientiert sich dichter am lateinischen Originaltext. In der Regel übernehme ich einzelne Termini aus der Ausgabe von Schüller (so z. B. *Scholion* statt *Scholium*). Um wichtige Begriffe genauer zu bestimmen, werden mitunter beide Übersetzungen herangezogen.

es jedoch, die dabei entstehenden Probleme herausgearbeitet und z. T. gelöst zu haben. Anstatt dies zu sehen und das damit einhergehende wissenschaftstheoretische Potential der Raumfrage auszuschöpfen, gibt es in der Forschung die Tendenz, über die internen Spannungen im newtonschen Werk hinwegzugehen und die Bedeutung der nachnewtonschen Naturphilosophie zu unterschätzen. Dem will sich diese Arbeit entgegenstellen. Anhand einer Analyse der Rezeption und Transformation des absoluten Raumes soll sie einen Beitrag zum Verständnis der Wechselwirkung von Metaphysik und Naturwissenschaft liefern. Es soll genauer betrachtet werden, wie sich beide Bereiche ausdifferenzieren und sich gegeneinander abgrenzen.

Dies macht eine Analyse der Position Fries' so interessant. Fries ist ein früher Anhänger Kants, der in kritischer Distanz dessen Lehre weiter ausarbeitet. Einer seiner Schwerpunkte liegt auf der Erweiterung der kantischen Naturphilosophie, wobei er ein feines Gespür für die philosophischen und naturwissenschaftlichen Entwicklungen seiner Zeit beweist. Sein Ziel ist es, zentrale Gedanken Kants an die sich verändernde Wissenschaftslandschaft anzupassen. Dies gilt insbesondere für seine Weiterentwicklung der kantischen Kritik des newtonschen Raumes.

In dieser Einleitung sollen die Leitfragen der Untersuchung anhand physikalischer und philosophischer Vorüberlegungen entwickelt werden. Zunächst werden dafür die physikalischen Probleme einer Raum- und Bewegungskonzeption der klassischen Mechanik herausgearbeitet (1.1). Daraufhin gilt es, eine übergeordnete philosophische Systematik darzulegen, anhand derer sich die Raumkonzeptionen Newtons, Kants und Fries' analysieren lassen (1.2). Daraus ergeben sich die Leitfragen (1.3) und die systematische Trias (1.4) der Untersuchung. Zuletzt wird das konkrete Vorgehen mit Bezug auf den aktuellen Forschungsstand skizziert (1.5).

1.1 PHYSIKALISCH-SYSTEMATISCHER HINTERGRUND DER RAUMDEBATTE

Für Kant und Fries sind Newtons *Principia* das Werk, das die Mechanik in den Status einer Wissenschaft erhoben hat. Während Kant und Fries die Physik der *Principia* weitgehend anerkennen, gilt ihre Kritik den metaphysischen Grundlagen des newtonschen Hauptwerks. Das erklärte Ziel von Kants *Metaphysische Anfangsgründen der Naturwissenschaft*[2] und Fries' *Mathematische*[*r*] *Naturphilosophie*[3] ist es deshalb, das metaphysische Fundament der *Principia* zu ersetzen. Zentrale Grundkonzeptionen der *Principia* wie das Gravitationsgesetz, die Konstitution der Materie und das Wesen des Raumes werden deshalb revidiert. Dabei soll die Mechanik Newtons jedoch weiterhin ihre Gültigkeit behalten.

2 Kants *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* werden im Folgenden als *MAN* abgekürzt.

3 Fries' *Mathematische Naturphilosophie* wird im Folgenden als *MN* abgekürzt.

Einer der zentralen Kritikpunkte Kants und Fries' ist Newtons absoluter Raum. Innerhalb der Mechanik Newtons kommt ihm eine wichtige erklärende Funktion zu. Um die Gültigkeit der Mechanik zu gewährleisten, muss es Kant und Fries deshalb gelingen, den newtonschen Raum adäquat zu ersetzen. So begründet Newton z. B. das Auftreten der Zentrifugalkraft am Verhältnis einer Bewegung zum absoluten Raum. Um Kants und Fries' Alternativkonzeptionen zu beurteilen, muss geklärt werden, inwiefern es ihnen gelingt, ohne Rückgriff auf Newtons Raum Zentrifugalkräfte zu erklären. Im Folgenden gilt es, die physikalischen Probleme zu untersuchen, denen sich eine Raumkonzeption der klassischen Mechanik stellen muss.

Man betrachte zunächst ein Inertialsystem S, d. h. ein Bezugssystem, in dem sich ein kräftefreier Körper geradlinig-gleichförmig bewegt.[4] In diesem System gelten die drei Bewegungsgesetze. Sie lauten:

1. Das Trägheitsprinzip

Ein Körper verharrt in Ruhe oder geradliniger und gleichförmiger Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt

$$\vec{p} = \text{const. für } \vec{F} = 0.$$

Wobei $\vec{p}$ der Impuls ist und $\vec{F}$ die Kraft, die auf einen Körper wirkt.

2. Das Aktionsprinzip

Die auf einen Körper wirkende Kraft ist gleich der zeitlichen Änderung seines Impulses

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}}.$$

Der Punkt über dem Impuls symbolisiert die Zeitableitung.

3. Das Reaktionsprinzip

Jede Kraft $\vec{F}_{12}$ eines Körpers 1 auf einen anderen Körper 2 führt gleichzeitig zu einer gleich großen, in die entgegengesetzte Richtung wirkenden Kraft $\vec{F}_{21}$ des Körpers 2 auf den Körper 1

4 Für die physikalischen Herleitungen vgl. im Folgenden Stephani / Kluge 1995, S. 43–48.

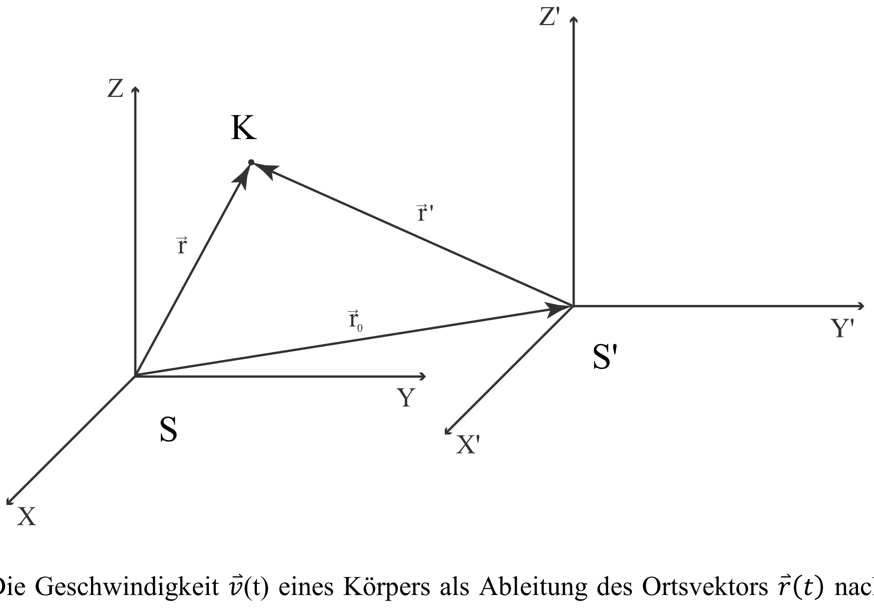
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Diese Gesetze gelten in dem oben genannten Inertialsystem S. Daraus ergibt sich die Frage, wie ein Inertialsystem erkannt werden kann. Die genannten Bewegungsgesetze sind Abstraktionen. So gibt es bspw. streng genommen keine kräftefreien Körper, da alle Körper mit anderen Körpern wechselwirken. Wie lässt sich dann aber ein Inertialsystem bestimmen? Im Weiteren soll untersucht werden, inwiefern sich die oben für ein Inertialsystem aufgestellten Bewegungsgesetze auf andere Bezugssysteme übertragen lassen. Dies kann anhand einer Koordinatentransformation zwischen S und einem anderen Bezugssystem S' geklärt werden. Das System S habe die Einheitsvektoren $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$ und $\vec{e}_z$. Der Ort eines beliebigen Körpers ist dann gegeben durch

$$\vec{r} = (x, y, z) = x \cdot \vec{e}_x + y \cdot \vec{e}_y + z \cdot \vec{e}_z$$

S' sei ein anderes, zum Inertialsystem S rotierendes oder translativ bewegtes Bezugssystem mit den Einheitsvektoren $\vec{e}_{x'}$, $\vec{e}_{y'}$ und $\vec{e}_{z'}$. Für die Ortsvektoren beider Systeme gilt dann

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}'.$$



Die Geschwindigkeit $\vec{v}(t)$ eines Körpers als Ableitung des Ortsvektors $\vec{r}(t)$ nach der Zeit t transformiert sich von S nach S' dann gemäß

$$\frac{d}{dt}\vec{r} = \vec{v} = \dot{\vec{r}}_0 + \frac{d}{dt}\vec{r}'$$

$$= \dot{\vec{r}}_0 + x' \cdot \dot{\vec{e}}'_x + y' \cdot \dot{\vec{e}}'_y + z' \cdot \dot{\vec{e}}'_z + \dot{x}' \cdot \vec{e}'_x + \dot{y}' \cdot \vec{e}'_y + \dot{z}' \cdot \vec{e}'_z.$$

Man definiere nun die Winkelgeschwindigkeit des Bezugssystemsystems S' zu S als $\vec{\omega} \times \vec{r}'(t) = x'(t) \cdot \dot{\vec{e}}'_x + y'(t) \cdot \dot{\vec{e}}'_y + z'(t) \cdot \dot{\vec{e}}'_z$. Es gilt

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}}_0 + \dot{\vec{r}}' + \vec{\omega} \times \vec{r}'.$$

Gemäß diesem Zusammenhang lässt sich die Geschwindigkeit $\vec{v}(t)$ von einem System S in ein anderes System S' transformieren. Das nochmalige Differenzieren führt zur Transformation der Beschleunigung

$$\frac{d}{dt}\vec{v} = \vec{a} = \ddot{\vec{r}}_0 + 2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \ddot{\vec{r}}'.$$

Hiervon lässt sich gemäß dem zweiten Gesetz der Mechanik ($\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m \cdot \vec{a}$)

auf die Transformation der Kräfte zwischen diesen Bezugssystemen schließen:

$$\vec{F} = m \cdot \ddot{\vec{r}}_0 + 2m \cdot \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}' + m \cdot \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}' + m \cdot \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}') + \vec{F}'.$$

Das heißt, dass beim Übergang von S nach S' die folgenden Kräfte eingeführt werden müssen:

Rotation von S' gegenüber S

Zentrifugalkraft: $m \cdot \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}')$

Corioliskraft: $2m \cdot \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}'$

Eulerkraft: $m \cdot \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}'$

Translative Beschleunigung von S' gegenüber S

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}_0$$

Diese Kräfte werden Scheinkräfte genannt, da sie lediglich durch die ‚falsche' Koordinatenwahl auftreten. Anhand geeigneter Transformationen können solche

Scheinkräfte, anders als bspw. in der klassischen Mechanik die Gravitationskraft, eliminiert bzw. durch die Trägheitsbewegung eines Körpers erklärt werden.

Für nicht rotierende ($\vec{\omega}=0$) und translativ nicht beschleunigte ($\ddot{\vec{r}}_0=0$) Bezugssysteme gilt: $\vec{F}=m\cdot\ddot{\vec{r}}'=\vec{F}'$. Die Differentialgleichung $\ddot{\vec{r}}_0=0$ wird erfüllt durch $\vec{r}_0(t)=\vec{v}\cdot t+\vec{c}_0$, d. h., wenn die Bezugssysteme sich geradlinig-gleichförmig zueinander bewegen. Ein solches Bezugssystem S*, das sich zu S geradlinig-gleichförmig bewegt, ist ebenfalls ein Inertialsystem. Es existiert somit eine Klasse von Inertialsystemen, in denen sich kräftefreie Körper gemäß dem ersten Gesetz der Mechanik verhalten. Diese Systeme sind ‚kräftekonservierend' zueinander in dem Sinne, dass die Kräfte in einem Inertialsystem S nach der Transformation in S* erhalten bleiben. Also gelten die oben genannten drei Gesetze der Mechanik für alle Inertialsysteme. Diese Eigenschaft wird als Galileiinvarianz bezeichnet. Bei einer Transformation von einem Inertialsystem in ein Nicht-Inertialsystem müssen hingegen die oben genannten Scheinkräfte aufgrund der ‚falschen' Koordinatenwahl eingeführt werden. Während in einem Inertialsystem S nur ‚tatsächlich vorhandene' Kräfte auftauchen, z. B. die Kraft einer gespannten Feder, müssen in einem Nicht-Inertialsystem Kräfte eingeführt werden, die es eigentlich ‚nicht gibt'.[5]

Aus der Galileiinvarianz ergibt sich ein weiteres Problem: Die Geschwindigkeit, die einem Körper zugeschrieben wird, ist vom gewählten Inertialsystem abhängig. Dies gilt bspw. nicht für die Beschleunigung eines Körpers, die ja aus der Wirkung von Kräften resultiert. Ob ein Körper ruht oder sich geradlinig-gleichförmig bewegt, ist zumindest gemäß den Bewegungsgesetzen lediglich eine Frage des gewählten Inertialsystems. Die geradlinige-gleichförmige Bewegung eines Körpers bringt keine Effekte hervor. Eine wichtige Frage ist jedoch, inwieweit einem Körper unabhängig vom gewählten Inertialsystem eine *tatsächliche* Geschwindigkeit oder sogar ein *tatsächlicher* Ort zukommt? Auch wenn diese tatsächliche Geschwindigkeit – man kann sie mit Newton auch absolute Geschwindigkeit nennen – nicht messbar ist, stellt sich die Frage, ob es nicht dennoch eine solche Geschwindigkeit gibt. Dies ist für Newton, Kant und Fries von großer Wichtigkeit.

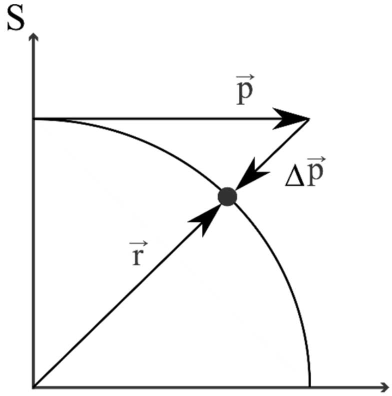
Doch zurück zu den oben hergeleiteten Scheinkräften. Für den in dieser Arbeit behandelten Zeitraum stellt die Erklärung der Zentrifugalkraft das wesentliche Problem dar. Daher werde ich im Folgenden von den anderen Scheinkräften, die bei der Rotation auftreten, absehen. Eine Schwierigkeit besteht nun in den Differenzen zwischen der Translation und der Rotation.

Ein Körper bewege sich in einem Inertialsystem S geradlinig-gleichförmig mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_S$. Im Fall dieser geradlinigen-gleichförmigen Bewe-

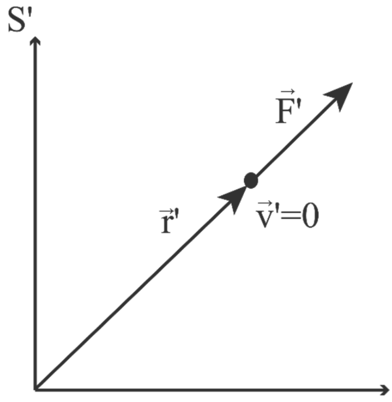
5 Ich blende hier absichtlich alle Aspekte der Scheinkräfte in der allgemeinen Relativitätstheorie aus. Diese Entwicklungen spielen für den zu untersuchenden Zeitraum keine Rolle. Eine klassische Betrachtung der Inertialsysteme reicht daher. Gleiches gilt für Aspekte der nicht-euklidischen Geometrie, die auf die hier zu diskutierende Entwicklung der Raumdebatte keinen Einfluss haben.

gung ist es nun möglich, ein anderes Inertialsystem S* zu wählen, in dem der Körper kräftefrei ruht.

Anders ist dies im Fall der Kreisbewegung. Man stelle sich dafür einen Körper vor, der sich gleichförmig auf einer Kreisbahn bewegt, da er bspw. an einem Seil rotiert. Aufgrund der Kreisbewegung spannt sich das Seil. Dies wird in einem Inertialsystem S durch die Abweichung von der Trägheitsbewegung erklärt:



Wie im Fall der geradlinigen-gleichförmigen Bewegung könnte man nun versuchen, ein Bezugssystem S' zu wählen, das die Bewegung des Körpers mitverfolgt, d. h. in dem der Körper ruht. In einem solchen Bezugssystem S' kann jedoch die Spannung des Seils nicht erklärt werden. Auf einen Beobachter innerhalb von S' würde eine Kraft in Abhängigkeit seines Abstandes von der Drehachse wirken. In diesem Bezugssystem muss also eine Scheinkraft eingeführt werden.



Trotz der relativen Ruhe des Körpers lässt sich demnach die Wirkung einer Kraft feststellen. Ein Beobachter in einem abgeschlossenen Bezugssystem S' kann also aufgrund der Zentrifugalkraft darauf schließen, dass es sich bei seinem Bezugssystem nicht um ein Inertialsystem handelt. Demnach kommt der Kreisbewegung eine Sonderrolle zu, die es zu erklären gilt.

Von diesen Überlegungen ausgehend lassen sich bereits die ersten Leitfragen der Arbeit skizzieren:

1. Anhand der physikalischen Betrachtungen wurde klar, dass es sich bei den Inertialsystemen um eine Klasse von Bezugssystemen handelt, in denen die Bewegungsgesetze der Mechanik gelten. Da alle Körper jedoch miteinander wechselwirken, findet strenggenommen keine Bewegung gemäß den Bewegungsgesetzen statt. Wie lässt sich dann aber ein Inertialsystem ermitteln?
2. Weiterführend muss das Verhältnis *eines* solchen Inertialsystems zu den anderen Elementen der Klasse der Inertialsysteme geklärt werden. Es wurde deutlich, dass die Bewegungsgesetze nicht nur in einem, sondern in allen Inertialsystemen gelten. Wie noch genauer zu diskutieren sein wird, geht Newton jedoch von nur *einem* absoluten Raum aus. Wie lässt sich aber ein solcher absoluter Raum innerhalb der Klasse der Inertialsysteme auffinden?
3. Schließlich muss die Natur verschiedener Bewegungstypen erklärt werden. Wie deutlich wurde, treten bei der Abweichung von der geradlinigen-gleichförmigen Bewegung z. T. Kräfte auf, die begründet werden müssen, sich jedoch nicht durch eine geeignete Koordinatenwahl ‚eliminieren' lassen.

Vorausgreifend sei gesagt, dass Newton den Sonderstatus der Kreisbewegung in seinem Eimerexperiment aufgreift. Darin wird anhand der Kraft auf eine rotierende Wasseroberfläche deutlich, dass eine bloß relationale Bewegungskonzeption zu kurz greift.[6] Die Wasseroberfläche nimmt aufgrund der Drehbewegung eine parabolische Form an. Diesen Effekt gilt es zu erklären. Das Eimerexperiment wird später in seinem historischen Zusammenhang tiefergehend untersucht. Den Kritikern der newtonschen Bewegungskonzeption muss es gelingen, die Effekte der Kreisbewegung verständlich zu machen, ohne auf den absoluten Raum zurückzugreifen.

1.2 KRITERIEN DER KLASSISCHEN UND MODERNEN WISSENSCHAFT

Anhand der physikalischen Vorbetrachtung sind zentrale Erfordernisse einer Raum- und Bewegungslehre der klassischen Mechanik herausgearbeitet worden. Die Analyse der Entwicklung der Raumkonzeption von Newton bis Fries soll zudem mit Blick auf eine übergeordnete philosophische Systematik geschehen. Diese muss mit Bezug auf die Thematik, die zu untersuchenden Denker und den Zeitraum gewählt werden.

Die vorliegende Arbeit analysiert die Entwicklung der Raumkonzeption innerhalb des Spannungsfeldes von Metaphysik und Naturwissenschaft. In den fast

6 Vgl. 2.2.3.