Zur genetischer Rekonstruktion der Vorstellungen zur Dynamik der Kreisbewegung

Josef Leisen, Universität Mainz

Die Bedeutung der Kreisbewegung in der Mechanik des 17. Jahrhunderts

Zweifelsfrei hatte die Kreisbewegung in der Physik spätestens seit ARISTOTELES eine Vorrangstellung gegenüber allen anderen Bewegungen inne.[1] Aufgrund ihres höheren Grades an Einfachheit und Geschlossenheit galt sie fundamentaler als die geradlinigen oder gar zusammengesetzten Bewegungen. Die Priorität der himmlischen Bewegungen vor den irdischen Bewegungen und die physikalisch begründete Forderung des ARISTOTELES von der Beschreibung der himmlischen Bewegungen mit ausschließlich Kreisbewegungen dokumentiert die der Kreisbewegung zugewiesene Vorrangstellung. Die Tatsache, dass dieses physikalische Prinzip des ARISTOTELES unangefochten trotz mancher Verletzungen hochgehalten wurde und bei COPERNICUS eine Restauration erfuhr, die letztendlich zur Heliostatik führte[2], weist auf die fundamentale Sonderstellung der Kreisbewegung in der Alten Physik hin. Die Heliostatik ihrerseits erfordert eine neue physikalische Begründung des mathematischen Weitmodells, speziell eine modifizierte Schweretheorie. Auf der Grundlage der copernicanisch-keplerschen Astronomie und der galileiischen Mechanik entstanden dann im 17. Jahrhundert eine neue Himmelsphysik und erstmals eine Himmelsdynamik.[3]

Somit kann der dynamischen Interpretation der Kreisbewegung für die Entstehung der neuzeitlichen Himmelsmechanik und der Dynamik überhaupt neben dem Trägheitsprinzip

---

[1] vgl. ARISTOTELES: Werke in deutscher Übersetzung. 3. Aufl. Band 11. Physikvorlesung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 701 S. hier: S. 261: "Kein Zweifel, dass die Kreisbewegung der Urtyp aller Bewegungsarten ist. Wie schon einmal gesagt, verläuft ja eine Bewegung entweder auf einer Kreisbahn oder aber auf einer Geraden oder aber schließlich auf einer Bahn, die ein Mixtum aus beiden darstellt. Zweifellos sind nun die beiden ersten Bewegungsgestalten fundamentaler als die letztgenannte; denn diese setzt sich aus den beiden ersten zusammen. Von diesen beiden nun ist wiederum die Kreisbewegung fundamentaler als die auf einer Geraden; denn sie besitzt den höheren Grad der Einfachheit und der Geschlossenheit. Eine Bewegung auf einer Geraden kann ja nicht unendlich fort gehen - denn Unendlichkeit, wie sie dazu gefordert wäre (im Modus der Wirklichkeit gegebene Unendlichkeit einer geraden Bahn), gibt es nicht. Überdies, selbst wenn es diese gäbe, könnte doch kein G eine solche ausführen; denn, was unmöglich ist, kommt nicht vor; eine unendliche Gerade zu durchlaufen, wäre aber unmöglich." (265 a 13-21)

[2] Vgl. KRAFFT, Fritz: Die sogenannte Copernicanische Revolution. Das Entstehen einer neuen physikalischen Astronomie aus alter Astronomie und alter Physik. Physik und Didaktik 2 (1974), 276—290.

[3] In der Antike gab es keine Himmelsdynamik. Selbst der Begriff wäre schon ein Widerspruch in sich selbst gewesen. Vgl. Dazu: KRAFFT, Fritz: Dynamische und statische Betrachtungsweise in der Antiken Mechanik. Wiesbaden: Franz Steiner 1970. XVI, 180 S. (Boethius 10). hier S. 168.

eine entscheidende Schlüsselrolle zu. In der Entstehungsgeschichte der klassischen Dynamik wird der Erkenntnis des Trägheitsprinzips mit Recht eine fundamentale Bedeutung zugewiesen; aber erst die dynamische Interpretation der Kreisbewegung führt das Trägheitsprinzip zur Universalisierung desselben.

Erst die Verbindung des Trägheitsprinzips mit der Kreisbewegung bringt die Mechanik einen entscheidenden Schritt vorwärts, indem geradlinige und kreisförmige Bewegungen unter ein einheitliches Beschreibungsmuster gestellt werden. Die Auffassung von der Analogie der Kreisbewegung zur geradlinig Bewegung muss ersetzt werden durch die von der Analogie der Kreisbewegung zur gleich mäßig beschleunigten Bewegung.[4] Der Vorstellungswechsel in der dynamischen Interpretation der Kreisbewegung leitet eine neue Ära ein, für welche die 'Prinzipia' Newtons sinnbildhaft steht.

NEWTON startete seine Überlegungen zur Kreisbewegung nicht mit neuen Bahn brechenden Ideen, sondern im Gegenteil auf der Ideenbasis seiner Vorgänger und Zeitgenossen. Jeder Physiker, der sich in der damaligen Zeit mit der Kreisbewegung beschäftigte kam nicht umhin, sich mit dem gesamten Ideenkonglomerat seiner Zeit bezüglich des Kraftbegriffes kritisch auseinanderzusetzen. Dazu gehörte die aus der Impetustheorie entlehnte Idee von der einem bewegten Körper 'eingeprägten Kraft'. In der aristotelischen Physik wurde die Bewegung als ein Prozess angesehen und war somit von der Ruhe Wesens verschieden. Es geht wohl hauptsächlich auf DESCARTES zurück, sowohl die gleichförmige Bewegung als auch die Ruhe gleichermaßen als Zustand. aufzufassen[5] und dem bewegten Körper eine 'eingeprägte Kraft' zuzuschreiben. NEWTON übernimmt den alten Terminus der Impetustheorie von der 'vis impressa' und deutet ihn vollständig um.[6] Zu der Umdeutung einer impetustheoretische Dynamik in eine Trägheitsdynamik ist NEWTON nach R. S. Westfall durch die Problematik der Kreisbewegung veranlasst worden[7]: „What then was the advantage that the dynamics built on the principle of inertia gained over the dynamics resting on the concept of impetus? The reconstruction of Newton's dynamice as he revised De motu early in 1685, points to the decisive role of the problem of circular motion."[8]

Die Vielfalt der Meinungen über ein Kraftkonzept und über das richtige Maß der Kraft war genauso verwirrend wie die Begriffsvielfalt dazu. Die von den Physikern des 17. Jahrhunderts benutzten Kraftkonzeptionen waren in der Regel jeweils auf spezifische Problemsituationen zugeschnitten und häufig untereinander inkompatibel. Solange nämlich nicht die verschiedenen physikalischen Erscheinungen unter ein einheitliches dynamisches Beschreibungsmuster gebracht werden konnten und solange nicht klar war welche physikalische Erscheinung das Paradigma einer Kraftkonzeption darstellen sollte, solange war auch nicht an eine abschließende Klärung des Kraftbegriffes zu denken. Die Richtung in der Auseinandersetzung mit der Kraftkonzeption im 17. Jahrhundert wurde wesentlich dadurch

---

[4] Vgl. WESTFALL, Richard 5.: Circular Motion in Seventeenth - Century Mechanics. Isis 63 (1972), 184 -189.
[5] Vgl. COHEN, Bernhard. 1: The Newtonian evolution. With illustrations of the transformation of scientific ideas. Cambridge: University Press 1980. IX, 404 3. hier S. 182.

[6] Nach Westfall vgl. Anm. 4, S. 186 startet Newton bei der frühen Anlage der Prinzipia um 1684 mit Vorstellungen auf der Basis der Impetustheorie. Vgl. auch Cohen S. 192 wie Anm. 4.

[7] Dieser Meinung schließt sich auch M. Wolff an in: WOLFF, Michael: Geschichte der Impetustheorie. Untersuchungen
zum Ursprung der klassischen Mechanik. Frankfurt a. M.: Suhrkamp 1978. 396 S. hier S. 315 f.

[8] vgl. R.S. Westfall: a.a.O. Anm. 4, S. 187

bestimmt, welche Erscheinungen von dem Forscher jeweils als paradigmatisch zugrunde gelegt wurde, sei es der Freie Fall, der Stoß oder einfache Maschinen[9] wie etwa der Hebel.

Dabei wurden von ein und demselben Forscher durchaus nicht konsistente Begriffe und Vorstellungen nebeneinander benutzt.[10] Der historische Gang zeigt, dass der Kreisbewegung in diesem Zusammenhang eine eindeutige Schlüsselrolle zukam. Solange es nämlich nicht gelang die Kreisbewegung dynamisch betrachtet in den Griff zu bekommen, solange blieb der Dualismus zwischen geradliniger und kreisförmiger Bewegung bestehen, solange blieb das Verständnis des Vektorcharakters der Bewegung verschlossen und damit die Interpretation der Richtungsänderung als Beschleunigung. Die Beherrschung der Dynamik der Kreisbewegung war die unabdingbare Voraussetzung zum Entstehen von Newtons 'Prinzipia'. Weil NEWTON die korrekte Konzeptionalisierung der Kreisbewegung erst kurz vor dem Entstehen der 'Prinzipia', wohl angeregt durch HOOKE vorgenommen hat, kommt dem Vorstellungswechsel besondere Bedeutung zu.

Die Vorstellungen zur Kreisbewegung bei GALILEI, DESCARTES und HUYGENS

Die Vorstellungen Galileis zur Kreisbewegung sind ganz auf sein Anliegen zugeschnitten, der copernicanischen Theorie zum Durchbruch zu verhelfen. Zeit seines Lebens hat GALILEI an den Grundzügen der Impetustheorie festgehalten und sie in Bezug auf die dynamischen Voraussetzungen der copernicanischen Lehre modifiziert. Diese Modifikation bezieht sich im wesentlichen darauf, dass er der horizontalen (reibungsfreien) Bewegung eines Körpers im Sinne der Kreisbewegung in gleich bleibendem Abstand vom Erdzentrum einen nicht ermüdenden stets gleich bleibenden Impetus zuschreibt, im Gegensatz zu den vertikalen Bewegungen oder den Wurfbewegungen bei denen der in den Körper eingeprägte Impetus abnimmt.[11] Das was häufig als 'zirkuläres Trägheitsprinzip' bezeichnet wird, erweist sich als der Impetustheorie zugehörig und führt das Beharren in der gleichförmigen Kreisbewegung auf eine gespeicherte 'vis impressa' zurück. Das Trägheitsprinzip der klassischen Mechanik hat mit dieser Vorstellung nichts mehr gemein. Mit der so konzipierten Kreisbewegung der Planeten erübrigen sich für GALILEI auch physikalische Erklärungsversuche wie sie KEPLER in der 'Astronomia Nova' auf der Grundlage einer magnetischen Kohäsionstheorie durchführt. Wie stark GALILEI bezüglich der Kreisbewegung noch in alten Denktraditionen steht, zeigt sich darin, dass er einzig und allein der Kreisbewegung und der Ruhe die ordnende Funktion im Universum zuschreibt.[12] Die Dichotomie der Bewegungen in vertikale

---

[9] Wolff wie Anm. 7, S. 329 ff weist dem Einfluss der Mechaniker und. Techniker auf die Kl des Kraftbegriffes und speziell auf das Entstehen der Auffassung von der Kreisbewegung als beschleunigte Bewegung besondere Bedeutung zu. Vgl. insbesondere S. 338.

[10] Vgl. WESTFALL, Richard 5.: Force in Newton's Physics: The science of Dynamics in the Seventeenth-Century. London: Macdonald; New York: American Elsevier 1971.

[11] Vgl. Wolff, M. wie Anm. 7, S. 294 f.

[12] Aus diesem Grunde stand GALILEI der keplerschen Theorie der elliptischen Planetenbahnen auch ablehnend gegenüber.
Die ordnende Funktion der Kreisbewegung kommt im 'Zweiten Tag' des 'Dialogo' zum Ausdruck, wo es heißt: "Daraus scheint mir, sollte man vernünftigerweise schließen, dass zur Erhaltung der vollkommenen Ordnung unter den Teilen des Universums gesagt werden muss: Bewegbare Körper sind, nur im Kreise bewegbar; Körper, die sich nicht in einer Kreisbahn bewegen, sind mit Notwendigkeit unbewegbar, weil nichts anderes als Ruhe oder Kreisbewegung zur Erhaltung der Ordnung geeignet ist." (Zitiert nach der Übersetzung in: CROMBIE, Alistair C.: Von Augustinus bis Galilei. Die Emanzipation der Naturwissenschaft. München: Deutscher Taschenbuch Verlag 1977, 5. 390.) Die Kreisbewegung ist die einzige Bewegung, die die Abstandsrelationen wahrt.

(gradlinige) und horizontale (kreisförmige) wird bei GALILEI beibehalten und die Kreisbewegung steht für ihn in Analogie zur Ruhe und nicht in Analogie zur beschleunigten Bewegung. Dabei hat GALILEIs Kinematik des freien Falles seine Nachfolger in die Lage versetzt, die Kreisbewegung zu quantifizieren und schließlich den traditionellen Dualismus zwischen geradliniger und kreisförmiger Bewegung zu überwinden.

Von moderner Sehweise aus muss es unverständlich erscheinen, warum der Dualismus nicht unmittelbar nach der Erkenntnis des klassischen Trägheitsprinzips durch DESCARTES überwunden wurde. Bei genauem Hinsehen erweisen sich alternative Erklärungen der Kreisbewegung als durchaus schlüssig für einen Physiker des 17. Jahrhunderts, der in den Denkraum seiner Zeit eingebunden war. DESCARTES bat die Mechanik des 17. Jahrhunderts in mehrfacher Hinsicht außerordentlich bereichert. So weist DESCARTES in den zwei ersten Naturgesetzen klar das klassische, geradlinige Trägheitsprinzip aus[13], dass ein Körper seinen Zustand beibehält, solange er nicht zur Änderung gezwungen wird und dass ein bewegter Körper die Tendenz zur geradlinigen Fortbewegung habe. Die Bedeutung des mit dem Trägheitsprinzip verbundenen Vorstellungswechsels liegt nach DESCARTES selbst darin, dass nicht mehr wie vormals erklärt werden muss warum sich ein abgeschossener nach dem Abschuss immer noch bewegt, sondern warum die Bewegung nicht auf immer weiter besteht.[14]

Des Weiteren hatte DESCARTES versucht, die verschiedensten Bewegungsänderungen auf eine einheitliche dynamische Ursache zurückzuführen. So erweist sich für ihn der Stoß eines Körpers mit einem anderen Körper als die einzige Möglichkeit Bewegungsänderungen zu bewirken. In einem nach der descartesschen Auffassung ausgefüllten Raum bietet sich die mechanistische Erklärung von allen Bewegungen als Wirkung von Druck und Stoß geradezu an. Kraft erweist sich für DESCARTES - wie für GALILEI vor ihm auch - als die Fähigkeit eines sich bewegenden Körpers andere durch Stoß zu bewegen. Das Kraftkonzept ist eindeutig auf den *aktiven* Körper und nicht auf den *passiven* Körper zu geschnitten. Die bewegende Kraft des aktiven Körpers überträgt sich beim Stoß auf den passiven, so dass die Bewegungsquantität in ihrer Gesamtheit erhalten bleibt.[15] Dieser Erhaltungssatz wird aber nicht physikalisch aus den Stoßgesetzen heraus begründet, sondern metaphysisch durch den Satz, dass Gott in der Welt stets dieselbe Bewegungsquantität erhält.

Des Weiteren wird die Bewegungsquantität nicht als Vektorgröße aufgefasst. Beides, der Zuschnitt der Kraft auf den aktiven Körper und die nichtvektorielle Auffassung der Bewegungsquantität haben für die Konzeptualisierung der Kreisbewegung durch DESCARTES grundsätzliche Bedeutung. Die moderne dynamische Interpretation der Kreisbewegung fast diese als die Resultante einer geradlinigen gleichförmigen

---

[13] DESCARTES schreibt in der 'Prinzipia philosphiae': The first law of nature: that everything whatever, - so far as depends on it, - always persevers in the same state; and thus whatever once moves always continues to move. The second law of nature: that all motion by itself alone is rectilinear …. (zitiert nach I. B. Cohen: a.a.O. wie Anm. 5 , S. 184)
Newtons Axiome in dem 'Waste Book' (ab 1660) haben ihre Wurzeln in den Axiomen Descartes'. Vgl. I .B. Cohen: a.a.O. wie Anm. 5, S.183 ff.

[14] Descartes schreibt: "we are freed of the difficulty in wich the Scholmen Lind themselves when they seek to explain why a stone continues to move for a while after leaving the hand of the thrower. For we should rather be asked why it does not continue to move for (zitiert nach: R. S. Westfall: a.a.O. wie Anm.9, S.59)

[15] Hier zeigt sich noch durchaus die Denkweise der Impetustheorie. Gleichzeitig bahnen sich hier Vorstellungen an, die auf ein Wechselwirkungsprinzip und einen Impulserhaltungssatz hinauslaufen, wenn auch noch nicht in vektorieller Form. Vgl. R.S. Westfall: a.a.O. wie Anm. 9, 3.64.

Trägheitsbewegung und einer beschleunigten Zentripetalbewegung auf; denn jede Änderung, auch die Richtungsänderung des Bewegungszustandes, erfordert eine externe *am* Körper angreifende Kraft. Damit wird dem rotierenden Körper eine passive Rolle zugewiesen.

DESCARTES selbst fasst die tangentiale Fortbewegung als Resultante einer originären Kreisbewegung und einer Zentrum fliehenden Bewegung auf, die durch eine interne Zentrum meidende Kraft bewirkt wird und solange sich der Körper in der Kreisbahn bewegt mit der haltenden Kraft im Gleichgewicht steht.[16] Damit weist DESCARTES die Kreisbewegung als ein Erhaltungszustand eigener Art aus und weist dem Körper eine aktive Rolle zu.[17]

Warum kann sich DESCARTES nicht von der Sonderstellung der Kreisbewegung lösen? Welche Argumentationsstruktur liegt seiner Auffassung zugrunde? Zunächst ist es die mechanistische Auffassung, nach der er in dem bewegten Körper letztlich die Naturvorgänge ursächlich begründet sieht und somit den aktiven bewegten Körper und nicht die an ihm wirkenden Kräfte in den Blickpunkt setzt. Die Aufgabe der mechanistischen Mechanik ist die Bestimmung der Fähigkeit bewegter Körper andere zur Bewegung zu bringen. Diese Auffassung ist nicht frei von impetustheoretischen Vorstellungen. Im Fall der Kreisbewegung zeigt sich die Fähigkeit des rotierenden Körpers zur Bewegung in der vermeintlich wahrgenommenen zentrifugalen Tendenz. R.S. Westfall sieht eine weitere Begründung für diese These in der Tatsache, dass DESCARTES die Kraft nicht als Vektorgröße auffasst, also zwischen Betrag und Richtung nicht differenziert.[18] Aus dem Stoß einer Kugel an einer harten Wand lässt sich nämlich keine Änderung des Geschwindigkeitsbetrages bei beliebigem Stoßwinkel feststellen. Folglich ist die bewegende Kraft eines bewegten Körpers vom Stoßwinkel unabhängig und Richtungsänderungen, so schloss DESCARTES führen nicht zu Geschwindigkeitsänderungen und sind somit von jenen grundsätzlich verschieden. Erst NEWTONs Auffassung von der Richtungsänderung als einer Form der Beschleunigung macht mit dieser Trennung Schluss.

Damit kommt der Kreisbewegung für die weitere Entwicklung nach DESCARTES eine Schlüsselrolle zu. Für ihn gehört die Kreisbewegung eigentlich gar nicht in die Dynamik, sondern in die Kinematik, so wie bei GALILEI auch. Die Sonderstellung der Kreisbewegung bleibt auch noch in der Zeit nach DESCARTES bestehen. Er selbst kann sich von der traditionellen Vorstellung der Kreisbewegung als eine ‘natürliche Bewegung‘ nicht lösen. Die Wirkungsgeschichte der descartesschen Konzeptualisierung ist beachtlich. Sie erwies sich für seine Zeitgenossen als sehr überzeugend, bildeten physikalische Erklärung, naturphilosophische Überzeugungen und die alltägliche Primärerfahrung, nämlich die vermeintlich wahrzunehmenden realen Zentrifugalkräfte, eine überzeugend befriedigende Komposition.

HUYGENS übernahm die mechanistische Auffassung DESCARTES‘ und dessen Konzeptualisierung der Kreisbewegung, obgleich er in der Quantifizierung der zentrifugalen Kräfte über DESCARTES hinausging. Der Zentrifugalkraftbegriff stellt eine Wortschöpfung HUYGENS‘ dar für die Kräfte, welche die Zentrum meidende Bewegung bewirken. Diese Zentrifugalkraft steht nach HUYGENS im statischen Gleichgewicht mit der haltenden Kraft, welche den Körper auf die Kreisbahn zwingt. HUYGENS‘ Behandlung der Kreisbewegung

[16] Vgl. R.S. Westfall: a.a.0. wie Anm. 9, 3S. 78 und S. 81.

[17] Vgl. M. Wolff: a.a.O. wie Anm. 7, S. 321.
[18] Vgl. R.S. Westfall a.a.O. wie Anm. 9, S. 66 f.

begann nämlich mit Überlegungen über die Analogie zwischen der Zentrifugalkraft und dem Gewicht.[19]

Ein an einem Faden hängender Körper befindet sich im statischen Gleichgewicht. Sein Bestreben, in einer beschleunigten Bewegung zu fallen, wird nach HUYGENS durch die rückhaltende Kraft des Fadens verhindert, und das Bestreben verhält sich, wie das Beispiel der schiefen Ebene zeigt, wie die Strecken, die der Körper in einer bestimmten Zeit zurücklegt. Diese Gedankenkette führt HUYGENS dazu, die Zentrifugalkraft mit dem Gewicht in Analogie zu setzen[20]; denn beide äußern gleichermaßen ihre potenzielle Wirksamkeit in der Spannung des haltenden Fadens, solange ein statisches Gleichgewicht besteht. Die dynamische Wirkung, sowohl des Gewichts als auch der Zentrifugalkraft zeigt sich in beiden Fällen in einer beschleunigten Bewegung. Diesen beschleunigten Bewegungen liegt ein quadratisches Weg-Zeit-Gesetz zugrunde. Für die Zentrifugalbewegung lässt sich dies aus der Kreisgeometrie ableiten[21] und für den freien Fall hatte das GALILEI nachgewiesen. In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass diese beschleunigte Bewegung von HIJYGENS nicht als 'Fallbewegung' zum Kreismittelpunkt hin unter der Wirkung einer Zentripetalkraft interpretiert wird, sondern umgekehrt, als eine solche, die unter einer zentrummeidenden Kraft von der Kreisbahn gerichtet ist. Die Resultante der Kreisbewegung und. der zentrummeidenden, fugalen Bewegung ergibt für HUYGENS in Übereinstimmung mit den Konsequenzen aus dem Trägheitsprinzip eine geradlinige Bewegung, wenn die haltende Kraft nicht mehr wirkt.

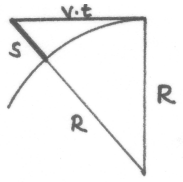
Wie DESCARTES kommt HUYGENS hier mit dem Trägheitsprinzip keineswegs in Schwierigkeiten. Die Analogie zwischen Gewicht und Zentrifugalkraft vergegenwärtigt sich nach HUYGENS in der analogen Weg-Zeit-Beziehung der von den Kräften verursachten beschleunigten Bewegung, nachdem die Körper sich selbst überlassen sind.[22] Die Vorstellung,

---

[19] Vgl. R.S. Westfall: a.a.O. wie Anm. 9, S.173: "His treatise began with an extended comparison of centrifugal force to weight. He saw their relation, not merely as analogues, but as cause and effect. In the early autumn of 1659 even before he had arrived at the quantitative expression for centrifugal force, Huygens had been convinced that it had to be similar to weight."

[20] "Hence it is certain that this endeavour will be wholly similar to that which is felt when a ball is held suspended from a string, since in this case also it endeavours to move away in the direction of the string with a motion similarly accelerated."
(zitiert nach: R.S. Westfall: a.a.O. wie Anm. 9, S. 169)
"The weight of a body is equal to the endeavour of an equal quantity of matter, moved very swiftly, to recede from the center. Whoever holds a body suspended prevents that matter from receeding; whoever allows the body to fall thereby offers to the same matter the opportunity to recede from the center along the radius; since however at the start it recedes from the center according to the series of odd numbers beginning with one, it is impossible that it not force the heavy body to approach the center with a motion similarly accelerated, with the result that these motions - the recession of matter from the center, and the approach of the falling body toward the center, are necessarily equal at the start." (C. Huygens zitiert nach der Übersetzung in R.S. Westfall: a.a.O. wie Anm. 9, S. 173)

[21] Mittels der Potenzreihenentwicklung für die Wurzelfunktion folgt:



$$(S+R)^2 = v^2t^2 + R^2$$

$$S = \sqrt{v^2t^2+R^2} - R \approx R\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{R^2}t^2\right) - R$$

$$S \approx \frac{1}{2}\frac{v^2}{R}\cdot t^2$$

[22] Vgl. dazu Anm. 20

dass ein Körper ein Gewicht (als Bestreben zu fallen)[23] hat und eine Zentrifugalkraft (als Bestreben das Zentrum zu meiden) hat, setzt den aktiven kreisenden Körper in den Blickpunkt und verstellt den Blick für äußere am Körper angreifende Kräfte.[24]

Die Beziehung zwischen Gewicht und Zentrifugalkraft ist für HUYGENS eine Analogiebeziehung in dem Sinne, dass beide dieselbe Wirkung haben. Für HUYGENS sind sie nicht in ihrer physikalischen Identität analog, so wie in der newtonschen Physik, wo die Gewichtskraft im Fall der Satellitenbewegung mit der Zentripetalkraft identisch ist.[25] Obwohl HUYGENS in den dynamischen Aspekten und insbesondere in den quantitativen Überlegungen über DESCARTES hinausgeht, so kann er den entscheidenden Vorstellungswechsel der mechanistischen Denkweise wegen nicht vollziehen. Denn solange noch die Idee von im Körper aufbewahrten bewegenden Kräften vorherrscht, solange kann die Kreisbewegung als Erhaltungszustand eigener Art angesehen werden und solange kann die Richtungsänderung auch nicht als Beschleunigung, durch externe Kräfte bewirkt, interpretiert werden. Eine naturphilosophische Grundauffassung, welche in dem bewegten, zur Bewegung fähigen Körper die wirkende dynamische Ursache sieht, konzentriert das Augenmerk auf den aktiven Körper und nicht auf die von außen angreifende richtungsändernde Kraft.[26]

Der Vorstellungswechsel über die Kreisbewegung bei HOOKE und. NEWTON

War HOOKEs Vorwurf des Plagiats der Gravitationsformel durch NEWTON insgesamt für beide nicht rühmlich, so ist es eine Tatsache, dass HOOKE in einer Hinsicht NEWTONs Mentor war, nämlich in der Konzeptualisierung der Kreisbewegung durch Zentripetalkräfte.

---

[23] "Gravity is the endeavour to descend." Huygens zitiert nach: R.S. Westfall: a.a.O. wie Anm. 9, S.168.

[24] bemerkenswert ist die Vorstellung, dass die augenblickliche Bewegung des Körpers, nachdem Gewicht oder Zentrifugalkraft wirken können, ihr Maß bestimmen. Vgl. R.S. Westfall a.a.O. wie Anm. 9, S. 168

[25] "Ferner kann man mittels des vorhergehenden Lehrsatzes und seiner Zusätze auch auf das Verhältnis der Centripetalkraft zu jeder bekannten Kraft schließen, wie z.B. zur Kraft der Schwere. Denn wenn der Körper sich auf einem um die Erde concentrischen Kreise vermöge seiner Schwere bewegt, so ist die letztere seine Centripetalkraft. Aus dem Falle der Körper wird aber nach § 18., Zusatz 9. sowohl die Umlaufszeit, als auch der in jeder Zeit beschriebene Bogen bekannt. Durch derartige Sätze hat Huygens in seinem vortrefflichen Werk über Pendeluhren die Kraft der Schwere mit den Centrifugalkräften umlaufender Körper verglichen." I. Newton: Mathematische Prinzipien der Naturlehre. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1963. S.60.

Hier rekurriert Newton sicherlich auf die huygenschen Untersuchungen zum Kegelpendel, wo die Gewichtskraft im Gleichgewicht mit der Zentrifugalkraft steht. Eine 'Mondrechnung' wie sie Newton später durchführte, lag für Huygens außerhalb des Denkrahmen er zahlenmäßig die zentrifugale Wirkung der Erddrehung um ihre tägliche Achse auf Körper der Erdoberfläche mit der Wirkung der Gewichtskraft verglich (d.h. Zentrifugalbeschleunigung mit der Erdbeschleunigung), so ging er damit der alten Frage copernicanischer Astronomie nach, nämlich der Frage, warum die Körper auf der Erdoberfläche nicht zentrifugal entschwinden. Vgl. auch Anm. 26.

[26] Vgl. R.S. Westfall: a.a.O. wie Anm. 9, S.173.
Die huygenssche Sehweise versperrt ihm das Verständnis des Zwei-Körper-Problems im Sinne Newtons, wie Huygens Reaktion auf Newtons 'Prinzipia' zeigt: "But seeing now by the demonstration of M. Newton that, supposing such a gravity toward the sun, and that it diminishes according to the said proportion, it counterbalances so well the centrifugal forces of the planets and produces precisly the effect of the elliptical motion that Kepler had guessed and proved by observation, I cannot doubt the truth either of these hypotheses concerning gravity or of the System of M. Newton, in so far as it based upon it ..." (zitiert nach I.B. Cohen: a.a.O. wie Anm. 5, S.80) Huygens akzeptiert zwar Newtons Erklärung der Planetenbewegung und dessen Identifikation der Zentripetalkraft mit der Gravitationskraft, aber denkt nach wie vor im Gleichgewichtskonzept zwischen Zentrifugal- und. Zentripetalkraft. Am Verständnis der 'Prinzipia' Newtons geht Huygens damit vorbei.

HOOKE war einer der wenigen, die im 17. Jahrhundert das Paradigma für ein Kraftkonzept in der galileischen Kinematik des freien Falles sahen und nicht in den Stoßvorgängen oder in den einfachen Maschinen. Trotzdem hatte HOOKE, von der praktischen Mechanik stark beeinflusst, kein durchgängiges Kraftkonzept. Die verschiedenartigsten Begriffe und Konzeptionen wurden in verwirrender Weise nebeneinander benutzt. Seinem sehr breiten Interessenspektrum entsprechend, wandte er sich auch Umwandlungsvorgängen zu und sprach in diesem Zusammenhang von externen Kräften, die aber unserem heutigen Arbeitsbegriff entsprechen.

1666 trug er vor der Royal Society über Himmelsbewegungen vor und beschreibt die Kreisbewegung erstmalig als kontinuierlich *von* der geradlinigen Trägheitsbewegung abgelenkte zentripetale Bewegung durch eine äußere *am* Körper angreifende Kraft. Wie ist es zu erklären, dass bei HOOKE auf den ersten Blick unvermittelt die Konzeptualisierung der Kreisbewegung aus Trägheit und Zentralkraft auftaucht? Gibt es Hinweise auf die Entstehung dieser Idee oder ist sie Ergebnis genialer Intuition? Folgt man einer Idee von M. Wolff, so hat die hookesche Konzeptualisierung der Kreisbewegung ihre Wurzeln in der Beschäftigung mit den Problemen der praktischen Mechanik. "Hooke, der Erfinder der Spiralfederuhr, hatte sich bereits jahrelang mit dynamischen Problemen zusammengesetzter Maschinen befasst und dabei das Problem der quantitativen Bestimmung jener Kräfte in Angriff genommen, die als Eigenschaft der in Bewegung befindlichen Maschinenteile oder als Folge der Bewegung eines Körpers auftreten. Aus der Beobachtung, dass die Verdoppelung der Umdrehungen eines Schwungrades die Vervierfachung eines nach Art einer Triebfeder daran applizierten Gewichtes erfordert, glaubte er den Schlüssel zur Berechnung dieser Kräfte gewinnen zu können. Der Impetus, der das Gewicht geradlinig nach unten treibt, soll dem Impetus entsprechen, der das Rad im Kreise herumführt. Hooke entnahm daraus die Annahme, dass die bewegende Kraft sich wie das Doppelte der Geschwindigkeit verhält, eine Annahme, die generell für alle mechanischen Bewegungen, geradlinige und kreisförmige, gelten sollte. …"[27]

Diese These wirkt umso überzeugender, wenn man sich noch ein mal die oben erwähnten Denkhemmnisse der rationalen Mechanik des 17. Jahrhunderts descartesscher Prägung vor Augen führt, die einer Umkonzeptionalisierung im Wege standen, nämlich der Zuschnitt auf den aktiven, bewegten Körper und die Auffassung der Kreisbewegung als ein Erhaltungszustand eigener Art. HOOKEs Zugang, von den Belangen der praktischen Mechanik geprägt, konnte den traditionellen Denkrahmen sprengen, weil sein Blick für extern wirkende und komplexere Bewegungsformen geschärft war.

Der Anstoß, den NEWTON von HOOKE bekam fiel jedenfalls, wenn auch mit Zögern, auf fruchtbaren Boden. In dem berühmten Brief HOOKEs vom 24. November 1679 an NEWTON heißt es: „ … hypothesis or opinion of mine ... of compounding the celestiall motions of the planetts (out) of a direkt motion by the tangent & an attractive motion towards the centrall body."[28] Im selben Brief erwähnt HOOKE die Vermutung, dass die Zentralkräfte die einen Planeten anziehen, dem Quadrat des Abstandes umgekehrt proportional seien. Am 25.11.1679 antwortete NEWTON und gesteht die Neuartigkeit der hookeschen Konzeptualisierung für ihn selbst, ging aber nicht näher auf HOOKEs Anliegen ein, sondern stellte die Frage nach dem Einfluss der Erdrotation auf die Bewegungskurve eines frei fallenden Körpers[29].

Irrtümlicherweise war NEWTON der Meinung, dass die Kurve eine Spirale sei. Dieser Irrtum und das zögernde Verhalten NEWTONs im weiteren Verlauf des Briefwechsels mit HOOKE

[27] M. Wolff: a.a.O. wie Anm. 7, S. 335
[28]
[29]

weisen darauf hin, dass die hookesche Konzeptualisierung der Planetenbewegungen für ihn neu war und erst nach einer gewissen Anlaufzeit zum vollen Erfolg führte.