Bull. Soc. Nat. luxemb., 89 (1989), p. 105–128

Galileo Galilei und die Mechanik

von

Prosper SCHROEDER

EINLEITUNG

Für die meisten Menschen ist Galilei zu einer Symbolfigur geworden. Für die einen stellt er den großen Vorkämpfer gegen den Obskurantismus des Katholizismus im Zeitalter der Gegenreformation dar, auf dessen Werk die neuzeitliche Naturwissenschaft aufbauen konnte, während er für andere den Schwarmgeist bedeutet, der ohne feste logische und empirische Grundlagen Theorien aufstellte, die er nicht schlüssig zu beweisen vermochte und der deshalb zurecht von seiner Kirche in die Schranken verwiesen wurde (20) (21). Diese Kontroverse entzündete sich vornehmlich an Galilei's astronomischem Werk und berührt uns deshalb in den folgenden Überlegungen, welche sich ausschließlich auf Galilei's Beiträge zur Wissenschaft der Mechanik beziehen, recht wenig (5).

Trotzdem ist auch das Studium seiner mechanischen Werke und besonders der wissenschaftshistorischen Literatur, welche auf diese Werke aufbaut, nicht einfach und die Interpretation dieser Arbeiten führt selten zu eindeutigen Schlußfolgerungen. Deren Autoren, die doch alle Galilei's mechanischen Werke studiert haben müßten, kommen oft zu gegensätzlichen Schlußfolgerungen und der eine sieht oft das Wesentliche in dem was ein anderer für nebensächlich hält und man kann hier durch Zitate erhärtet sehen, was dort mit anderen Zitaten bestritten wird (20) (21) (27). Man kann Galilei selbstverständlich zu Gute halten, daß seine Vorstellungen während seines Lebens eine starke Entwicklung durchgemacht haben, daß der Galilei von Pisa ein anderer ist als der von Padua, daß der Autor der Discorsi (2) (3) (4) die uns im nachfolgenden vor allem beschäftigen werden, ein Älterer ist als noch hauptsächlich sein Gewicht als Vater der modernen Naturwissenschaft), auf den sich auch heute begründet. Da er jedoch in den Discorsi Fragmente aus seinen älteren Werken aufnimmt und damit die lineare Darstellung seiner Erkenntnisse immer wieder stört, entstehen die größten Brüche in der Galilei-Interpretation durch die unechten Bilder dessen was man den Galileimythos nennen kann. Dieser Mythos wurde und wird lebendig erhalten durch Autoren die zum Teil mittels einer

extrem starken Vereinfachung ideologische Zielsetzungen verfolgen und die sich deshalb nicht die Mühe gemacht haben, die gemachten Mitteilungen an der historischen Quelle zu prüfen. Auch das italienische Nationalgefühl hat, besonders im 19. Jahrhundert, zu einer Überzeichnung eines Idealbildes der Person von Galilei geführt.

Trotzdem können diese zum Teil einseitigen Galileibilder die wissenschaftliche Größe der Person Galilei's nicht relativieren und es bleibt eine Tatsache, daß er wohl am meisten zur Erstehung der klassischen Naturwissenschaft beigetragen hat, auch wenn es bei den Wissenschaftshistorikern immer wieder Kontroversen gibt und geben wird, welche denn nun eigentlichh seine größten Beiträge zu dieser neuen Wissenchaft gewesen seien.

Leben und Werk (8) (9) (10) (11) (12) (13)

Es gibt eine schier unübersehbare Literatur über Galilei und seine Zeit, die leicht zugänglich ist und zudem immer noch durch neue Werke erweitert wird. Wir können uns also in dem hier interessierenden Zusammenhang auf eine kurze Einführung beschränken, die vor allem dazu dienen soll die Arbeiten Galilei's über Mechanik in sein Gesamtwerk einzuordnen.

Galileo Galilei wurde im Jahre 1564 in Pisa geboren und verstarb in Arcetri bei Florenz am 8. Januar 1642. Kopernikus war 1543 gestorben, in dem gleichen Jahre in dem sein großes Werk „De revolutionibus orbium coelestium libri sex" erschien. René Descartes lebte von 1596 - 1650 und der 'Discours de la méthode' erschien 1637, ein Jahr vor den 'Discorsi', dem letzten Werk Galilei's. Newton wurde 1642, im Todesjahr Galilei's, geboren. Er lebte bis zum Jahre 1727 und sein Hauptwerk 'Philosophiae Naturalis -Principia Mathematica' erschien 1687. Galilei, aus florentinischem Stadtadel entstammend, verschrieb sein ganzes Leben der Wissenschaft und dem Unterricht. Seine Leidenschaft, die Natur verstehen zu wollen, sowie das Bedürfnis die Resultate seiner Forschung anderen Menschen nahezubringen, gepaart mit einem regen polemischen Geiste, bescheerten ihm große Schwierigkeiten zeit seines Lebens. Nach seinen Studien in Pisa und einem kurzen Aufenthalt als Professor an dieser Universität, unterrichtete er längere Zeit die Naturphilosophie an der Universität Padua auf dem Territorium der Republik Venedig, ehe er nach Florenz als Hofmathematiker des Großherzogs von Toskana zurückkehrte. Von der katholischen Kirche wegen Häräsie angeklagt, wurde er trotz des Schutzes den ihm der Großherzog gewährte, schließlich 1633 verurteilt und er mußte öffentlich seinen kopernikanische Ansichten abschwören. Nachdem er kurze Zeit in Rom im Gefängnis der Inquisition verbracht hatte, wurde er schließlich zum Hausarrest in seiner Villa in Arcetri bei Florenz begnadigt, wo er dann sein Hauptwerk über Mechanik, die 'Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze' schrieb.

Das wissenschaftliche Werk Galilei's ist sehr umfangreich und kreist hauptsächlich um zwei große Themen:

a) die Astronomie: Galilei versucht einen schlüssigen Beweis für die Gültigkeit des kopernikanischen Systems aufzustellen und zwar durch Himmelsbeobachtung gepaart mit theoretischen Überlegungen.

b) die Mechanik: Galilei stellt die Lehre von der Bewegung auf eine neue Grundlage die auch heute noch als die Begründung der Kinematik in der Mechanik gilt.

Diese beiden Themenkreise durchdringen sich zum Teil ohne jedoch eine Einheit zu bilden. Diese wird erst 50 Jahre später durch Newton erreicht. Galilei ist im allgemeinen kein systematischer Denker und weit entfernt von Descartes, der ihm das zum Vorwurf macht. Auch wenn im Nachhinein in der Wissenschaftsphilosophie viel über Galilei's Empirismus sowie seinen Positivismus geschrieben wurde, war er zeit seines Lebens immer mehr an der Beobachtung, aber auch am Experiment interessiert als an einem nur einseitigen Nachdenken über methodologische Prinzipien die in seinen Werken eher als Nebenprodukt anfallen.

Chronologisch ist das astronomische Werk Galilei's zwischen den Jugendschriften über die Bewegung sowie seinem letzen Buch, den 'Discorsi' angesiedelt. Es beginnt 1610 mit der Veröffentlichung seiner ersten Beobachtungen mit dem von ihm entwickelten Fernrohr und wird abgeschlossen, bedingt auch durch seine Verurteilung durch die katholische Kirche, mit dem 'Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme' im Jahre 1632.

Wir werden uns im folgenden ausschließlich mit den Werken Galilei's über Fragen der Mechanik beschäftigen. Es sind dies vor allem die Schriften 'De motu' von 1589; 'Le Mecaniche', geschrieben 1593-94 respektive 1599 in einer verbesserten Fassung, sowie sein Hauptwerk, die 'Discorsi' von 1638, ebenso wie sein Traktat über schwimmende Körper 'Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua' von 1612 (1).

Aristotelische Physik und Impetustheorie (18) (19) (23) (24) (32)

Im 16. Jahrhundert muß sich die scholastische Naturphilosophie, hervorgegangen aus der Übertragung des ganzen Aristoteles sowie vieler Kommentare arabischer und jüdischer Denker ins Lateinische zu Beginn des 13. Jahrhunderts, an vielen Fronten verteidigen. Weithin war anerkannt, daß das überkommene Wissenschaftssystem der Erneuerung bedurfte, doch niemand wußte so recht wie man sich diese Erneuerung vorzustellen hatte. Platonisten und Hermetiker, Kabbalisten und Anhänger der chemischen Philosophie versuchten die Schwierigkeiten, die in der aristoletischen Wissenschaft immer unüberwindlicher wurden, durch den Rückgriff auf eine gereinigte Tradition zu bewältigen, welche die Idee des großen kosmischen Organismus sowie die Entspechung vom Makrokosmos mit dem menschlichen Mikrokosmos und ihre gegenseitige Verbundenheit durch Sympathien und Antipathien ins Zentrum stellte. Dieser auf der Metaphysik

begründete Erneuerungsversuch mußte in eine Sackgasse führen. Nicht so jedoch die aus dem Nominalismus des Wilhelm von Ockham hervorgegangene Richtung, deren vornehmste Vertreter in Paris sowie am Merton College in Oxford lehrten, und deren Ideen in der Impetustheorie und der quantitativen Erfassung des Ablaufes von Bewegung gipfelten. Wir werden uns im Folgenden auf die Darstellung der aristotelischen Dynamik sowie der Impetustheorie beschränken und kurz auf die Resultate der Mertonianer eingehen.

Die aristotelische Physik geginnt mit alltäglichen Beobachtungen, die wir heute wie zur Zeit des Aristoteles anstellen können, und unterwirft dieselben einer kohärenten und systematischen Analyse. Auch wir finden es heute noch natürlich, daß ein schwerer Körper nach unten fällt, oder daß die Flamme eines Zündholzes nach oben zeigt. Genau wie Aristoteles oder Thomas von Aquin wären wir hoch erstaunt, wenn ein Stein oder ein Stier z.B. sich in die Luft erheben würde. Nach Aristoteles beginnt nun Wissenschaft wo ein natürliches Verhalten eine Erklärung erfordert. Er unterscheidet zwischen natürlicher und gewaltsamer Bewegung und diese Unterscheidung bezieht sich auf eine Gesamtschau der physikalischen Realität. Sie wird geprägt durch den Glauben an die reale Existenz qualitativ definierter "Naturen" sowie an ein Ordnungsprinzip im Kosmos nach welchem alle Dinge einer hierarchischen Ordnung unterworfen sind. Diese Ordnung sowie die ihr zugrunde liegende Harmonie bedingen, daß im Weltall jedes Ding seinen Ort hat und das Konzept des "natürlichen Ortes" ist eine der theoretischen Grundlagen der aristotelischen Physik. Die gewaltsame Entfernung eines Körpers von seinem matürlichen Ort, ruft in ihm das Verlangen hervor dorthin zurückzukehren. Jede Bewegung kann also als eine Störung des Gleichgwichtes im Universum angesehen werden. Sie ist entweder das direkte Resultat eines Zwanges oder aber die Reaktion eines Körpers auf einen solchen Zwang, wenn er versucht sich mittels einer 'natürlichen Bewegung' wieder an seinen matürlichen Ort zu begeben.

Für Aristoteles wird damit die Ordnung zu einem dauerhaften und stabilen Zustand und die Ruhe muß nicht erklärt werden. Damit wird der Begriff der Bewegung im weitesten Sinne zu einem Grundbegriff der aristotelischen Physik ohne dessen Kenntnis die Natur nicht erkannt werden kann. Dieser zentralen Stellung entspricht eine ebenso eigenartige Definition des Bewegungsbegriffes. Bewegung im allgemeinsten Sinne des Wortes wird jeder Übergang vom potentiellen zum aktuellen Sein genannt, gleichgültig ob dabei eine substanzielle Form ins Leben gerufen wird oder vergeht, ob die Eigenschaften eines Dinges sich ändern, ob es quantitative Änderungen erfährt oder ob es den Ort wechselt.

Die Definition der Bewegung als Übergang von der Potenz zum Akt oder als Weg zur Form, zeigt klar, daß sie kein Zustand sein kann sondern ein Prozess, ein Fließen und Werden. Sich bewegen heißt sich ändern, in sich selbst oder in Bezug auf anderes. Bewegung verlangt also ein Referenzsystem in Bezug auf das ein Ding sich bewegt oder sich ändert. Ein Teil aller Änderungen sind, wie Aristoteles in seiner Definition ausführt, Bewegungen im Raum. Sie setzen einen festen Punkt voraus und dieser kann nur das

Zentrum der Welt sein. Weil nun jede Änderung, jeder zeitliche Prozess zu seiner kausalen Erklärung einer Ursache bedarf, so bedarf jede Bewegung eines Bewegers (Motor) der sie andauern läßt, solange er vorhanden ist. Und zwar muß dieser Beweger entweder dem Körper selbst innewohnen oder in unmittelbarem Kontakt zu ihm stehen, da es für Aristoteles keine Fernwirkung gibt.

Im Falle der natürlichen Bewegung ist der Beweger die "Form" des Körpers die ihn an seinen Ort zurückholt und dadurch die Bewegung aufrecht erhält. Zumindest drei wichtige Fragen werden durch diese eher pauschale Erklärung nicht beantwortet: Die erstere geht nach der genaueren Natur dieser 'Form' welche den fallenden Körper in Bewegung bringt und hält. Die zweite möchte wissen, wie es kommt, daß der eine Körper eine gegebene Strecke in kürzerer Zeit durchläuft als der andere. Und die dritte fragt nach der Ursache die bewirkt, daß die Körper im Fallen ihre Bewegung beschleunigen.

Die Antwort auf die erste Frage nach der Art der 'Form' braucht uns im weiteren nicht mehr zu beschäftigen, da sie für die Entwicklung der Mechanik nicht relevant ist. Nicht so die beiden anderen Fragen. Die zweite Frage, wie es kommt, daß nicht alle Körper gleich schnell fallen, wird von Aristoteles nicht ausdrücklich als solche behandelt, man kann jedoch seine Meinung darüber aus verschiedenen anderen Stellen entnehmen wo er sich bei anderen Überlegungen auf diese Erscheinung beruft. Er nimmt an, daß die über eine bestimmte Strecke gemittelte Fallgeschwindigkeit proportional zur Schwere des fallenden Körpers und umgekehrt proportional zur Dichte des Mediums ist. In algebräischer Schreibweise lautet das Fallgesetz von Aristoteles:

$$v = f \cdot \frac{G}{W}$$

(G = Gewicht; W = Widerstand des Mediums; v = durchschnittliche Geschwindigkeit).

Aus diesem Gesetz ließe sich leicht das allgemeine dynamische Gesetz der aristotelischen Physik ableiten, obschon das Aristoteles nie getan zu haben scheint, was wiederum von der antiken Denkweise her betrachtet, selbstverständlich ist.

Auch auf die dritte der oben formulierten Fragen ist die Antwort des Aristoteles recht vage. Er zeigt nur, daß eine natürliche Fallbewegung sich nicht bis ins Unendliche erstrecken kann, da sonst die Geschwindigkeit und damit die Schwere des Körpers, jede Grenze überschreiten müßte.

Deshalb hat man ihm auch wohl die Meinung zugeschrieben, daß die Schwere bei Annäherung an den natürlichen Ort zunehme. Das wäre jedoch gegen den Geist seines Systems in dem nicht die Beziehungen zu anderen Dingen die Schicksale der stofflichen Körper bestimmen, sondern nur ihre eigene Art und Natur.

Wenn die Antworten des Aristoteles im Falle der natürlichen Bewegungen vage und unsicher blieben, so scheint seine Erklärung der erzwungenen

Bewegung konkreter zu sein, auch wenn sie einen der merkwürdigsten Züge der aristotelischen Physik darstellt. Für ihn bringt der Werfer beim Fortwerfen eines Körpers, während er noch in Kontakt mit ihm ist und so als Beweger fungiert, zugleich die angrenzende Schicht des Mediums in Bewegung. Außerdem, und das ist der springende Punkt, teilt er ihr das Vermögen etwas anderes in Bewegung zu bringen mit und überträgt damit seine Funktion auf diese Schicht des Mediums. Und diese tut dann dasselbe wie der ursprüngliche Beweger, d.h. sie überträgt die Bewegung sowie das Vermögen des Inbewegungsetzens auf die nächste Schicht. Das bewegende Vermögen wird aber bei jeder Übertragung etwas abgeschwächt und der Augenblick kommt wo die nächste Schicht des Mediums zwar noch in Bewegung gesetzt wird, das Vermögen ihrerseits die darauffolgende Schicht in Bewegung zu setzen nicht mehr vorhanden ist. Der geworfene Körper geht nun in seine natürliche Bewegung über und wird von seiner "Form" an seinen natürlichen Ort gebracht.

Die aristotelische Physik hatte also längst nicht alle Fragen bei der Behandlung der Fall- und Wurfbewegungen zufriedenstellend beantwortet und ihre Theorien gaben manchen Anlaß zum Zweifeln. Als die Mechanik des Aristoteles nun im 13. Jahrhundert im christlichen Abendlande bekannt wurde, unterzog man sie wie seine übrigen naturwissenschaftlichen Ideen logischer und auch empirischer Prüfung. Dies führte im 14. und 15. Jahrhundert zu radikaler Kritik an seinen dynamischen Theorien. Die eine Richtung dieser Kritik bemüht sich um die Abklärung was denn eigentlich der Beweger bei der Fallbewegung sei und hat alle Philosophen der Scholastik von Albertus Magnus über Thomas von Aquino, Siger von Brabant bis zu Bonaventura und sogar Roger Bacon beschäftigt. Eine andere Richtung der scholastischen Philosophie versucht für die Wurftheorie bei Philoponos anzuknüpfen, der sich auf Grund seiner Erfahrung gegen die Behauptung des Aristoteles wendete, daß ein Körper desto schneller falle je schwerer er ist. Weiter verwarf Philoponos die Theorie der erzwungenen Bewegungen der aristotelischen Physik und führte dafür den Begriff des inneren bewegVermögens ein, der in der Scholastik dann den Namen 'impetus' und 'vis impressa' erhält (24). Die Impetustheorie, sehr wahrscheinlich gespeist aus arabischen Quellen um Avicenna, findet sich bei vielen Scholastikern seit dem 13. Jahrhundert und gelangt zu ihrem Höhepunkt bei den Nominalisten um Ockham und Johannes Buridan der zur Schule der Pariser Terministen gezählt wird.

Wenn man einen Körper in erzwungene Bewegung bringt, so teilt man ihm einen 'impetus' mit, der die Bewegung fortdauern läßt nachdem man den Körper losgelassen hat. Dieser 'impetus' ist umso größer je mehr Materie der geworfene Körper besitzt und je schneller man ihn fortbewegt. Dem Impetus entgegen wirkt der Widerstand des Mediums und, im Falle eines hinaufgeworfenen Körpers, zugleich die Schwere die diesen an seinen natürlichen Ort zurückbringen will. Der Widerstand des Mediums läßt eine in Drehung versetzte Töpferscheibe bald wieder zur Ruhe kommen. Widerstand und Schwere bewirken, daß ein nach oben geworfener Körper bald einen höchsten Punkt erreicht, wonach die Schwere ihn wieder zum Fallen bringt. Die Impetustheorie kann auch erklären, wie es kommt, daß

die Fallbewegung mit wachsender Geschwindigkeit verläuft. Die Schwere, anfänglich allein wirkend, läßt den Körper nicht nur fallen sondern verleiht ihm auch einen Impetus, der ihn nun mit ihr zusammen fortbewegt; dadurch wird die Bewegung schneller und der '"impetus' größer. Der Körper, durch die konstante Schwere und einen stets wachsenden 'impetus' angetrieben, wird sich also immer schneller bewegen.

Die Definition die Buridan für den Impetus gegeben hat, führte bei einigen Wissenschaftshistorikern zu einer Gleichsetzung dieses Begriffes mit der 'Quantité de mouvement' von Descartes oder Galilei's 'momento' und damit zu einer Vorwegnahme von Schlüsselbegriffen der klassischen Mechanik. Es muß jedoch betont werden, daß der Impetusbegriff, trotz dieser oberflächlichen Verwandschaft, doch in seiner Bedeutung als Motor, als Beweger, ganz in die Sphäre der aristotelischen Physik gehört und darum auch so ausgezeichnet mit den Grundgedanken der peripatetischen Dynamik zusammenpasst. Buridan sah seine Lösung des Bewegungsproblems lediglich als Beitrag zur scholastischen Diskussion der aristotelischen Physik an. Trotzdem hat sein Versuch Bewegungen am Himmel und auf der Erde in einem einzigen System der Dynamik zu erfassen, die große Denkreform in den Naturwissenschaften des 16. und 17. Jahrhunderts mit hervorgebracht.

Alle Lösungsversuche des Bewegunsproblems, sei es im Rahmen der peripatetischen Physik oder aber der Denkschemata um die Impetustheorie, waren begrenzt durch die beständige Mischung von Argumenten qualitativer und quantitativer Art. Als im späten Mittelalter sich die Einsicht durchsetzte, daß alle echten Unterschiede auf Verschiedenheiten innerhalb der Kategorie der Quantität zurückzuführen seien, vollzog sich ein bedeutsamer Wandel durch den die Mathematik in der physikalischen Forschung, eine immer größere Rolle zu spielen begann und damit den Weg zur modernen Naturwissenschaft eröffnete.

Aristoteles hatte physikalische Phänomene in nicht umkehrbare und qualitativ verschiedene Bestandteile zerlegt. Die nun einsetzende mathematische Betrachtung in der Physik führte die qualitative Verschiedenheit auf Unterschiede in der geometrischen Struktur, in Zahl und Bewegung, mit einem Wort auf quantitative Unterschiede zurück (32). Für Roger Bacon, einer der ersten Verfechter dieser Betrachtungsweise, war deren Hauptkernpunkt dies: "Alle Kategorien hängen von der Kenntnis einer Quantität ab, die mathematisch zu fassen ist und deshalb ist die ganze Vortrefflichkeit der Logik von der Mathematik abhängig." Die neuen Methoden entwickeln sich dann auch zunächst in Verbindeung mit dem Gedanken funktionaler Abhängigkeit. Wenn man das zu erklärende Phänomen als eine algebraïsche Funktion der notwendigen und hinreichenden Bedingungen ausdrückt, so läßt sich genau zeigen, wie Veränderungen des ersten mit den Veränderungen der letzteren zusammenhängen. Für die Darstellung funktionaler Zusammenhänge wurden zwei Hauptmethoden erarbeitet. Die erste war die 'Wort-Algebra' wie sie Thomas Bradwardine für seine Mechanik benutzte. Darin wurden Verallgemeinerungen durch Buchstaben ausgedrückt. Mathematische Operationen wurden in Worten beschrieben und nicht wie in der Modernen Algebra durch Symbole ausgedrückt. Mittels

dieser Formulierung konnte Bradwardine zeigen, daß die aristotelische Analyse der Bewegung mit den Tatsachen bewegter Körper, so wie er sie verstand, nicht übereinstimmten. Er interpretierte das aristotelische Bewegunsgesetz auf der Basis des Theorems der Campanus von Novara das besagt:

$$\text{"wenn } \frac{a}{b} = \frac{b}{c} \text{ dann ist } \frac{a}{c} = \frac{(b)^2}{c}$$

Er meint nun, das Gesetz von Aristoteles wolle aussagen, daß wenn ein gegebenes Verhältnis G/W die Geschwindigkeit v erzeuge, dann müsse zur Verdoppelung der Geschwindigkeit das Verhältnis nicht 2. G/W, sondern $(G/W)^2$ werden; bei Halbierung der Geschwindigkeit sei das Verhältnis G/W. Bradwardine's Bewegungsgesetz lautet damit in moderner Terminologie:

$$v = \log \frac{G}{W}$$

Da der Logarithmus von 1 gleich 0 ist, erfolgt nach diesem Gesetz bei gleichen Werten von Kraft und Widerstand keine Bewegung, außerdem ergibt die Formel eine stetige Veränderung von v wenn G/W sich 1 nähert.

Außer von Bradwardine wurde die Methode der Wortalgebra vor allem am Merton College Oxford von William von Heytesbury sowie Richard Swineshead und der Gruppe der 'Calculatoren' gepflegt, und später in Paris weiterentwickelt (32).

Die zweite Methode der Darstellung von Funktionsbeziehungen war eine geometrisch graphische Methode. Sie entwickelte sich aus der Aufgabe, das Ausmaß in dem eine Qualität: eine 'Form' zu- oder abnahm mit Hilfe einer festen Skala in Zahlen auszudrücken. Die graphische Darstellung der Intensiätsgrade einer Qualität gegenüber ihrer Ausdehnung geschah durch geradlinige Koordinaten wobei die letztere durch eine horizontale Gerade dargestellt wurde, während dem Intensitätsgrad eine senkrechte Vertikale entsprach. Die Veränderung der Intensität, als Bewegung aufgefaßt, wurde gleichförmig genannt, wenn in gleichen Zeitintervallen, auf der Abzisse aufgebracht, gleiche Strecken zurückgelegt wurden. Ungleichförmig war sie, wenn in gleichen Zeitabständen ungleiche Strecken zurückgelegt wurden. Diese Bewegung konnte 'gleichförmig - ungleichförmig' sein, wenn eine gleichmäßige Beschleunigung oder Verzögerung stattfand.

In Paris war es neben Albert von Saxen vor allem Nicolaus Oresmus der diese Methode auf kinematische Probleme anwandte (19). Seine Methode ermöglichte es, lineare Veränderungen der Bewegung korrekt darzustellen. Die Geschwindigkeit eines Körpers der sich mit gleichmäßiger Beschleunigung fortbewegt, ist im Hinblick auf die Zeit gleichförmig ungleichförmig. Heytesbury definierte nun die Beschleunigung als Geschwindigkeit der Geschwindigkeit und gab auch eine Definition der Augenblicksgeschwindigkeit als deren Maß er den Raum angab, den ein Punkt durchlaufen würde, wenn er sich eine gegebene Zeitlang mit der Geschwingdigkeit eines festgesetzten Augenblickes bewegen könnte.

Diese Definition, sowie die Analyse verschiedener anderer Bewegungsformen, führte schließlich zur Merton'schen Regel nach welcher der Weg, der in einer gewissen Zeit zurückgelegt wird, bei gleichförmig veränderlicher Bewegung und Anwachsen der Geschwindigkeit von Vo bis Vt, gleich dem Weg ist, der bei einer gleichförmigen Bewegung deren Geschwindigkeit $\frac{Vo + Vt}{2}$ ist, in der gleichen Zeitspanne zurückgelegt wird. Dieser Satz wurde dann von Oresmus mit geometrischen Methoden bewiesen.

Alle diese Entwicklungen in Paris und Oxford führen im 15. Jahrhundert bei Leonardi da Vinci und Domingo de Soto zum richtigen Gesetz der Beschleunigung beim freien Falle. In der Tat erfeuten sich die "Calculatores"vom Merton College lange großer Popularität, zuerst in Paris und in Deutschland, aber im 15. und 16. Jahrhundert dann auch in Italien besonders in Padua. Der Lehrer von Galilei in Pisa: Francesco Bonamico war mit den bedeutendsten Schriften von Heytesbury, Swineshead, Bradwardine und Buridan bestens bekannt, wie es sein enormes Werk: 'De Moti libri X', das 1591 in Florenz erschien, erschöpfend beweist. Galilei hatte über dieses Werk einen direkten Zugang zu allen Bestrebungen die Physik zu quantifizieren, und hat, wie wir es anschließend sehen werden, besonders in seinen Jugendwerken auf dieses Wissen zurückgegriffen (25).

Außer diesen rein philosophischen und physikalischen Überlegungen gab es noch die Mathematik und zwar vor allem in der von Archimedes gepräg Form, welche dann einen entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der Kinematik und Dynamik nehmen sollte (14). Archimedes wurde zum ersten Mal um 1269 von Willem von Moerbeke ins Lateinische übersetzt. Eine zweite Übersetzung wurde 1450 von Jacobus Cremonensis angefertigt. Nicolo Tartaglia gab seinerseits im Jahre 1543 eine lateinische Übersetzung von Archimedes Werken, welche zum ersten Mal auch teilweise dessen Abhandlung über schwimmende Körper enthielt. Der vollständige Text dieser Abhandlung wurde dann 1565 in Venedig publiziert. Und es war diese Abhandlung die dann Galilei jenen Hebel in die Hand gab, welcher über die Bewegungslehre einen Pfeiler nach dem anderen im aristolischen System zum Einsturz brachte.

Galilei's mechanische Frühschriften (1) (25) (26)

Galilei tritt 1589 eine Professorenstelle für Mathematik in der Universität Pisa an. Er findet genügend Zeit sich in die Dynamik des Impetus einzuarbeiten unter Benutzung der Schriften der Jesuitengelehrten des Collegio Romano. Gleichzeitig verfasst er eine Schrift mit dem Titel 'De motu' welche die peripatetische Bewegungslehre scharf kritisiert und eine Mathematisierung der Physik anstrebt. Galilei basiert sich auf Archimedes Arbeit: 'Über schwimmende Körper'als Ansatzpunkt für seine Bewegungslehre und folgt damit Benedetti der in seinem Werk: Lösung aller euklidischen

Probleme...' von 1530 das gleiche tat. Benedetti wie Galilei verbanden das spezifische Gewicht von Körpern mit der von ihnen erreichbaren Geschwindigkeit im freien Fall und schufen damit eine Brücke zwischen Archimedes und der Impetustheorie. In neuzeitlicher Notation lautet das von ihnen angegebene Gesetz für die Fallgeschwindigkeit:

$$P = P_a - P_m$$

$$V = P - W$$

mit P_a = spezifisches Gewicht des Körpers im Vakuum
und P_m = spezifisches Gewicht des Mediums.

Wenn letztere Formel von arabischen Gelehrten wie z. B. Avempace schon im 12. Jahrhundert angegeben wurde, so ist die erstere von Benedetti und Galilei eingeführt worden. Die frühe Gelilei'sche Bewegungslehre geht damit davon aus, daß das natürliche Fallen oder das gewaltsame Steigen eines Körpers, - denn die Erklärung der natürlichen Fallbewegung und der gewaltsamen Bewegung nach oben erfolgt prinzipiell auf gleiche Weise, - nicht eine beschleunigte sondern eine konstante Bewegung hervorruft. Eine Beschleunigung ist zwar vorhanden, doch wirkt sie nur zu Beginn der Bewegung - so lange bis die natürliche, der Differenz der spezifischen Gewichte von Körper und Medium proportionale Geschwindigkeit, erreicht ist. Galilei kann sich durch Versuche überzeugen, daß schwere Körper in der Natur sich nicht so verhalten wie von ihm angenommen. Allein er ist noch zu stark in die aristotelische Tradition eingebunden, daß der Hinweis auf Tatsachen, die seinen Hypothesen widersprechen, als hinreichendes Argument für die Verwerfung eben dieser Hypothesen gelten könnte. Diese Haltung hängt auch eng mit der Einführung von Gedankenexperimenten zusammen, welche gedachte Versuchsanordnungen sind, deren tatsächliche Ausführung aus praktischen Gründen unmöglich ist, deren großer Vorteil jedoch darin besteht, daß störende Faktoren nicht auftreten können und deshalb eine Beschränkung der Analyse auf die idealen Bedingungen, die ausschließlich in mathematischen Begriffen erfaßt werden, möglich ist. Durch diese Methode wird der Wahrheitswert der Axiome unprüfbar, sodaß deren Überprüfung nicht mehr möglich ist und damit reduziert sich die Prüfung allein auf die Ableitungen aus den Axiomen. Diese jedoch kann, mit rein logischen Methoden nachvollzogen werden.

Zwischen 1594 und 1600 entsteht eine zweite Arbeit über Mechanik mit dem Titel: 'Le Mecaniche', eine kurze Abhandlung über einfache Maschinen in der Tradition von Heron und Pappos. Galilei zeigt, daß im Gegensatz zur herrschenden Auffassung keine Maschine Kräfte erzeugen oder vervielfältigen kann; Maschinen können Kräfte nur transformieren.

Was man mit ihrer Hilfe an Kraft gewinnt, verliert man an Geschwindigkeit und an Zeit. Galilei führt in dieser Schrift den Begriff des 'Momentes' ein, der so etwas wie die wirkende Kraft bezeichnet und Gewicht, Kraft, Weg und Zeit verknüpft. Der Begriff des Momentes führt Galilei dann zum Prinzip der virtuellen Verschiebungen und damit wird er zu einem der Begründer der neuzeitlichen Statik.

Im Jahr 1612, als Antwort auf eine Kontroverse mit den Aristotelikern veröffentlicht Galilei ein weiteres Werk über Mechanik, den 'Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua' (11). Auch dieser Traktat basiert auf Archimedes und verteidigt dessen Ansichten über schwimmende Körper gegen die Peripatetiker, welche nicht nur das spezifische Gewicht, sondern auch die geometrische Form als Kriterium zur Ermittlung der Schwimmfähigkeit einführen wollten.

Galilei demonstriert hier konkret am Beispiel der Hydrostatik wie, seiner Meinung nach, eine physikalische Theorie beschaffen sein muß, wenn sie vor der Erfahrung Bestand haben soll. Ausgangspunkt der Untersuchung sind klare Definitionen, sowie die hydrostatischen Theoreme des Archimedes. Mit ihrer Hilfe beweist Galilei seinen Hauptsatz, daß Körper im Wasser sinken oder steigen, je nachdem ob sie spezifisch schwerer oder leichter als Wasser sind, durch mathematische Deduktion. Das von den Peripatetikern in die Diskussion eingeführte Gegenbeispiel einer Kugel aus Ebenholz welche im Wasser sinkt, während eine dünnes Brett des gleichen Materials durch geschickte Plazierung in das Wasser auf demselben schwimmt, forderte Galilei's ganzen Scharfsinn heraus. Er ersann für die Lösung dieses Problems eine ungemein raffinierte Interpretation im Rahmen seiner Theorie, und er argumentierte, daß die Luft welche sich über dem Ebenholzplättchen befindet und quasi zwischen den 'Wassermauern' um das Brett durch eine natürliche Affinität zwischen dem Holz und der Luft festgehalten wird in das Gewicht einbezogen werden muß. Da Luft spezifisch viel leichter als Wasser ist, so hat das aus Holz und Luft bestehende Objekt ein kleineres spezifisches Gewicht als das umgebende Wasser und das Plättchen schwimmt. Galilei baut seine ganze nachfolgende Theorie auf diesem Prinzip der Affinität auf und gerät dann auch in Schwierigkeiten mathematischer Art, die jedoch beiseite geschoben werden. So erscheint der ganze Traktat als ein eher fragwürdiger Triumph methodischer Strenge über die auch von Galilei viel beschworene Erfahrung.

Die Discorsi (2) (3) (4)

Die Discorsi oder wie der vollständige Titel der Originalausgabe Elzevirs in Leiden 1638 lautete: 'Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienzi attenenti alla mecanica e i movimenti locali' stellen den eigentlichen Höhepunkt im wissenschaftlichen Schaffen Galilei's dar. Diese Grundlegung des mechanistischen Weltmodells ist die aufregendeste Leistung Galilei's überdie meist am wenigsten oder überhaupt nicht berichtet wird.

Die Discorsi führen die literarische Form der 'Dialoge' fort. Sie sind in vier Tage eingeteilt. Ein fünfter Tag über die euklidische Proportionenlehre und ein sechster Tag über die Stoßkraft wurden nicht rechtzeitig fertig und sind dann Torsi geblieben. Als Anhang zum vierten Tag hat Galilei die kurze Jungendschrift: 'Theorien über den Schwerpunkt solider Körper' hinzugefügt ohne Zweifel um bei dieser Gelegenheit die kleine Studie vor der Vergessenheit zu bewahren.

Die 'Discorsi' sind dem Comte de Noailles gewidmet der auch den Druck derselben besorgte, weil Galilei jede Publikation von der Kirche infolge seiner Verurteilung untersagt war. Die Gespräche werden wie im 'Dialog'- von Salviati, Sagredo und Simplicio geführt, getreu der Ankündigung am Ende des 'Dialogo', ein demonstratives Zeichen dafür, daß Galilei nach dem Inquisitionsprozeß einfach da weitergemacht hat, wo er vor dem Prozeß aufgehört hatte. Allerdings sind die Naturen der drei Gesprächspartner ausgeglichener und Simplicio, weniger ausschließlich auf die scholastische Philosophie fixiert, wirkt fast kooperativ.

Die Discorsi beginnen mit einem Lob auf die Praktiker des Arsenals in Venedig. Sie besitzen umfassendere Kenntnisse auf dem Gebiet der Mechanik als die Gelehrten, da sie fortwährend Maschinen und Appatate konstruiren und so durch Erfahrung manches Prinzip gewonnen, das sie jedoch theoretisch nicht erklären können. Genau das jedoch will Galilei tun. Und so beginnt dann die Unterhaltung mit dem Problem warum daß maßtäblich vergrösserte Maschinen von einer gewissen Vergrösserung ab zusammenbrechen, statt zu funktionieren. Salviati erklärt, daß von einem bestimmten Punkt ab die Bruch- und Zugfestigkeit des Materials überschritten wird und er führt als Bestätigung seiner Lösung an, daß auch die Skelette großer Tiere niemals maßtabgerechte Übersetzungen des Baues kleiner Tiere sind.

Und dann beginnt sofort das große Netz der Abschweifungen an diesem ersten Tag der Gespräche und die mehr systematische Abhandlung der Bruchfestigkeit wird auf den zweiten Tag verschoben (12). Die am ersten Tag behandelten Probleme bilden ein wahres Kaleidoskop. So ist z.B. die Meinung Salviati's, Adhäsion sei durch den "Horror vacui" zu erklären ein Irrtum, aber der anschließende Versuch, Wasser im Vakuum auszudehnen ist genial und dient zur Messung der Kraft des Vakuums. In anderen Abschweifungen gelangt Galilei über die Untersuchung der Begriffe endlich-unendlich, teilbar-unteilbar zum hyperbolischen Kreis und Punktesystem und damit zum unendlichen großen Kreis, dessen Umfangslinie eine Gerade bildet und schließt daraus genau wie Nikolaus von Kues auf das "Unendliche in der Einheit".

Dann gibt Galilei einen Versuch für die Messung der Lichtgeschwindigkeit an: Zwei Personen stellen sich nachts mit Lampen in der Hand in einiger Entfernung auf, und jeder deckt sein Licht in dem Augenblick auf, indem der andere das seine zudeckt. Die Entfernungen werden vergrößert, um zu sehen ob die Zeitintervalle gleich bleiben. Galilei bemerkt, daß die Entfernungen zu kurz waren um ein Ergebnis zu zeitigen aber er gelangt so zu einem intuitiven Begriff der Größe der Lichtgeschwindigkeit.

Dann wird Salviati gefragt, ob er eine Linie in unendlich viele Teile zerlegen könne. Er kann und knickt die Linie zu Polygonen von immer mehr Seiten bis sie schließlich ein Kreis wird. Zum Vergleich des freien Falles im Vakuum und im Medium mit Widerstand wird der Isochronismus des Pendels benutzt. Die Pendelschwingungen dienen auch als Analogon zur Erklärung akustischer, konsonanter und dissonanter Schwingungen. Damit endet der erste Tag.

Der 'Discorsi' 2. Tag - Galilei's Festigkeitslehre

Der zweite Tag dient in der Hauptsache dem Studium der Bruchfestigkeit, von der die Gesprächspartner am Anfang des ersten Tages durch Abschweifungen abgelenkt wurden. Galilei's Theorie der Bruchfestigkeit beruht ausschließlich auf dem Hebelgesetz, und es ist interessant zu sehen wie Galilei die Betrachtungsweise von Archimedes dessen Buch: 'Über das Gleichgewicht ebener Flächen' er natürlich kennt, modifiziert. Archimedes Buch beginnt mit sieben Annahmen über das Gleichgewicht bzw. das Ungleichgewicht am Hebel und über die Lage von Schwerpunkten und bezieht sich nach griechischer Art ausschließlich auf Verhältnisse mit rationalen Zahlen. Galilei handelt alle Sonderfälle des Archimedes in einem einzigen Satz ab. Er denkt sich ein horizontales homogenes schweres Prisma und eine ebenso lange homogene Stange an der das Prisma an seinen Enden aufhängt. Die Stange selbst besitzt in der Mitte ihre Aufhängung. Es läßt sich sofort einsehen, daß in diesem Falle Gleichgewicht besteht. In ihm ist nun aber jeder andere Fall enthalten was Galilei auf folgende Weise zeigt: Sei die Länge der Stange sowie des Prismas 2 (m + n). Das Prisma wird nun derart entzwei geschnitten, daß das eine Stück die Länge 2 m, das Zweite die Länge 2 n hat. Das kann ohne Störung des Gleichgewichtes bewerkstelligt werden, wenn zuvor die Enden der beiden Stücke hart an dem Schnitt durch Fäden an der Stange befestigt werden. Es können nun auch alle vorhandenen Fäden entfernt werden, wenn zuvor die beiden Prismenstücke in deren Mitte auf der Stange aufgehängt werden. Da die ganze Länge der Stange 2 (m + n) ist, so beträgt eine jede Hälfte m + n. Damit ist also die Distanz des Aufhängepunktes des Prismenstückes 2 m gleich n, die Distanz des Prismenstückes der Länge 2 n ist gleich m. Da Galilei aus Erfahrung weiß, daß es auf das Gewicht und nicht auf die Form des Körpers ankommt, ist das Hebelgesetz in seiner allgemeinen Form bewiesen.

Nach dem Beweis des Hebelgesetzes gibt es die einzige Abschweifung des zweiten Tages. Galilei löst das Problem der Beziehung zwischen der Kraft die auf einen Hebel ausgeübt werden muß und dem Gewicht der Last die es zu bewegen gilt. Die Ableitung erfolgt nach dem Hebelgesetz. Nun kehrt er zurück zu der Aufgabe die er sich gestellt hat: die Beziehung zwischen der Zugfestigkeit eines Materials und der Bruchfestigkeit desselben Materials auf Biegung. Er führt seine Überlegungen an einem Kragarm der Länge l aus. der an seinem freien Ende mit dem Gewicht P belastet ist. Das Moment P•l setzt er nun gleich mit dem Moment der inneren Kräfte am eingespannten Ende. Mit B als Bruchfestigkeit gibt Galilei dieses Moment mit 1/2 B • h an, wobei h die Höhe des Balkens ist und seine Breite als Einheit angenommen wird. Hier irrt nun Galilei, denn er setzt mit dieser Formel implizit die Dehnung der Fasern gleich 0 und nimmt als neutrale Achse die untere Kante des Balkens an. Die richtige Beziehung des Gleichgewichtes zwischen gezogenen und gedrückten Fasern wird erst später von Mariotte, Parent und Bernoulli angegeben. Da Galilei jedoch ausschließlich mit Verhältnissen von Festigkeiten, nicht jedoch mit absoluten Werten operiert, hat der Fehler keinen Einfluß auf die folgenden Lehrsätze des zweiten Tages.

Galilei zeigt dann mit dem eben gefundenen Lehrsatz, daß die Höhe eines Kragbalkens und nicht seine Querschnittsfläche bestimmend für seine Tragfähigkeit ist. Er führt dann das Eigengewicht des Tragbalkens ein und zeigt, daß bei Berücksichtigung des Eigengewichtes das äußere Moment eine quadratische Funktion der Länge des Kragbalkens ist.

Durch geschickte Manipulation von Proportionen in archimedischer Manier beweist Galilei nun drei Lehrsätze über das Verhältnis der Tragfähigkeiten von Prismen oder Zylindern ungleicher Länge aber gleichen Querschnittes, gleicher Länge aber ungleichen Querschnittes sowie ungleicher Länge und ungleichen Querschnittes. Gleichzeitig wird der Begriff der Grenzfestigkeit eines Körpers eingeführt indem Galilei beschreibt, daß es nur einen Körper bestimmter Figur geben kann der unter seinem Eigengewicht zerbricht, so daß jeder größere sich nicht selbst tragen kann während jeder kleinere eine Festigkeitsreserve besitzt. Dieser Begriff wird nun dazu benutzt einen Lehrsatz über die Konstruktion von solchen Grenzkörpern wieder in der Art des Archimedes zu beweisen.

Galilei geht dann auch auf Träger mit anderen Auflagerungsbedingungen ein und behandelt Balken mit Unterstützungen an beiden Enden oder mit einem Unterstützungspunkt zwischen den beiden Enden. Er führt diese Fälle bei alleiniger Betrachtung der Grenztragfähigkeit auf den Kragbalken zurück und zeigt, daß die ersteren die doppelte Länge des letzteren haben. Auch die Beanspruchung eines einfachen Balkens aus Momenten durch äußere Kräfte, bestimmt Galilei indirekt indem er nachweist, daß sich das Verhältnis der Summe der Auflagerkräfte bei der Belastung mit je einer Einzellast in verschiedenen Abständen von den Auflagerpunkten sich verhält wie das Verhältnis der Produkte der Strecken zwischen den Auflagern und dem Angriffspunkt der jeweiligen Last.

Galilei geht dann auf die Bestimmung der Form von Balken gleichen Widerstandes in allen Querschnitten ein und schließt so wieder an die Praxis des Arsenalingenieurs an. Er beweist, daß ein solcher Kragbalken gleichen Widerstandes für eine Einzellast in einer beliebigen Entfernung vom Auflager die Form eines halbparabelförmigen Prismas hat und er hebt die Materialersparnis hervor, die durch die allgemeine Einführung einer solchen Balkenform erreicht werden könnte, bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung, die beim Bau von Schiffen von großer Bedeutung ist.

Der Schluß des zweiten Tages handelt über die Festigkeit von Hohlkörpern. Galilei ist bekannt, daß hohle feste Körper eine weit größere Bruchfestigkeit haben als volle Körper gleicher Form und gleichen Gewichtes. Er beweist den Satz, daß die Widerstände zweier Zylinder von gleicher Maße und Länge, von denen der eine hohl und der andere massiv ist, sich zueinander verhalten wie die Durchmesser.

Im Gegensatz zu der Lehre von der Bewegung die Galilei an den beiden folgenden Tagen behandeln wird, ist seine Festigkeitslehre noch sehr stark der alalogen Anschauung verhaftet. Sie schöpft noch aus der Unmittelbarkeit der Technik seiner Zeit und bleibt bei aller Mathematisierung ein Produkt des 17. Jahrhunderts und der zu dieser Zeit bekannten statischen Kenntnisse.

Gleichförmige und ungleichförmige Bewegungen am 3. Tag der 'Discorsi' (29)

Mit dem dritten Tag ändert sich der Charakter der 'Discorsi'. War in den beiden ersten Tagen der Dialog vorherrschend, am zweiten Tag durch einige Lehrsätze unterbrochen, so sind der dritte und vierte Tag die karge Einkleidung einer mechnischen Abhandlung auf mathematischer Basis mit sehr wenigen Erklärungen in Gesprächsform. Galilei schrieb diese Abhandlung in Latein während die drei Gesprächspartner weiterhin das Italienische benutzten.

In seiner Einführung gibt Galilei sein Forschungsprogramm bekannt:

- er bringt und beweist neue Resutate
- er quantifiziert unter Anwendung der Mathematik bekannte qualitative Tatsachen und schafft damit eine neue Wissenschaft, nicht nur durch die von ihm erreichten Resutate sondern auch durch die in seinem Ansatz enthaltenen Möglichkeiten.
- er beschäftigt sich mit der Bewegung als fundamentalem Phänomen der Natur.

Seine Abhandlung teilt er in 3 Teile. Im ersten betrachtet er die gleichförmige Bewegung. In dem zweiten, viel längeren, wird die gleichförmig beschleunigte Bewegung beschrieben. Im dritten Teil, dem der 4. Tag der Discorsi gewidmet ist, wird von der gewaltsamen Bewegung oder von den Wurfgeschossen gehandelt.

Galilei stellt dem Teil seiner Abhandlung über gleichförmige Bewegung eine Definition und ein Axiomsystem voran und passt sich damit bewusst der Tradition um Euklid und Archimedes an. Diese Vorgehensweise erlaubt seiner Abhandlung eine hypothetisch-deduktive Struktur zu geben. Seine Voraussetzungen lauten mit seinen Worten:

Definition:

> Ich nenne diejenige Bewegung gleichförmig, bei welcher die in irgend welchen gleichen Zeiten vom Körper zurückgelegten Strecken unter einander gleich sind.
>
> I. Axiom
> Die bei ein und derselben Bewegung in längerer Zeit zurückgelegte Strecke ist größer als die in kürzerer Zeit vollendete
>
> II. Axiom
> Bei gleichförmiger Bewegung entspricht der größeren Strecke eine größere Zeit
>
> III. Axiom
> In gleichen Zeiten wird bei größerer Geschwindigkeit eine größere Strecke zurückgelegt als bei kleinerer Geschwindigkeit
>
> IV. Axiom
> Die Geschwindigkeit bei welcher in einer gewissen Zeit eine größere Strecke zurückgelegt wird, ist größer als die Geschwindigkeit bei welcher in derselben Zeit eine kleinere Strecke vollendet wird.

Im Sinne der Alten bestand ein Axiomsystem aus evidenten Sätzen die von jedem, der Sprache Mächtigen verstanden wurden und die nur allgemein verständliche Wörter enthalten durften.

Desto erstaunlicher wirkt die Einführung des Begriffes der Geschwindigkeit im 3. und 4. Axiom ohne, daß er in der Definition der Bewegung eingeführt wurde und ohne, daß der genaue Sinn dieses Begriffes je definiert wird. Galilei scheint diesem Begriff einen rein semantischen Inhalt zuzugestehen, denn er kann ihn nicht definieren, weil im Sinne der klassischen Mathematik die Division von Längen durch Zeiten einfach undenkbar ist. Mathematische Verhältnisse werden nur durch homogene Größen gebildet und Galilei kann bestenfalls Verhältnisse von Strecken mit Verhältnissen von Zeiten vergleichen. Wenn schon die gleichförmige Geschwindigkeit derartige Schwierigkeiten bereitet, so gilt das in noch grösserem Maße für augenblickliche Geschwindigkeiten welche den Begriff der Ableitung nach der Zeit voraussetzen. Durch die geschickte Umgehung, der durch die Einführung des Geschwindigkeitsbegriffes verursachten Schwierigkeiten, kann Galilei die Zeit und die Geschwindigkeiten in das euklidische Axiomsystem einführen und damit die Mathematisierung der Kinematik durchführen. Im Anschluß an sein Axiomsystem beweist er sechs Lehrsätze über die gleichförmige Bewegung. Die wichtigsten vier ersten lauten:

Lehrsatz 1: Wenn ein gleichförmig bewegter Körper mit gleicher Geschwindigkeit zwei Strecken zurücklegt, so verhalten sich die Zeiten wie die Strecken;
Lehrsatz 2: Wenn ein Körper in gleichen Zeiten zwei Strecken zurücklegt, so verhalten sich diese Strecken wie die Geschwindigkeit. Und wenn umgekehrt die Strecken wie die Geschwindigkeiten sich verhalten so sind die Zeiten gleich;
Lehrsatz 3: Bei ungleichen Geschwindigkeiten verhalten sich bei gleichen Strecken die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Zeiten;
Lehrsatz 4: Wenn zwei gleichförmig bewegte Körper ungleiche Geschwindigkeiten haben, so verhalten sich die in ungleichen Zeiten zurückgelegten Strecken wie das zusammengesetzte Verhältnis aus den Geschwindigkeiten und Zeiten.

Alle vier Lehrsätze werden von Galilei mittels geometrischen Überlegungen aus seinem Axiomsystem sowie aus der Proportionenlehre von Euklid bewiesen. Auf den 4. Lehrsatz baut Galilei nun in der Hauptsache seine Theorie der gleichförmig beschleunigten Bewegung auf.

Der zweite Teil von Galilei's Abhandlung beginnt mit einem einführenden Text an dem auffällt, daß er den Begriff der Beschleunigung zwar kennt, aber nicht genügend beherrscht um auch ihn dirkt mathematisieren zu können. Sein erstes Ziel ist also diesen Begriff enger zu fassen indem er als Physiker vorgeht und den freien Fall betrachtet. Ein aus der Ruhelage von bedeutender Höhe herabfallender Stein, erlangt nach und nach neue Zuwachse an Geschwindigkeit und die einfachste Art ist eine stetige gleichförmige Zunahme. Aus dieser Betrachtung folgt schließlich die Definition der Bewegung von der Galilei handeln wird: "Gleichförmig oder einförmig

beschleunigte Bewegung nenne ich diejenige die von Anfang an in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwüchse erteilt".

Zwischen der Einführung und den Lehrsätzen fügt Galilei wieder einen erklärenden Text in Form eines Gespräches ein in dem folgende Punkte behandelt werden: Salviatis Gesprächspartner haben Schwierigkeiten sich einen gleichmäßigen Zuwachs einer Größe vorzustellen. Galilei's Erklärung die er durch den Mund Salviati's gibt, zeigt daß er das Konzept der Ableitung intuitiv beherrscht, daß er jedoch aus diesem Konzept noch keine konkreten Folgerungen ziehen kann. Gleich Archimedes versucht er den Begriff der Ableitung mittels bekannter geometrischer Methoden zu umschreiben um ihn auf diesem Weg zu benutzen. Sodann schlägt Sagredo vor die Idee der gleichförmig beschleunigten Bewegung mit der Impetustheorie zu koppeln. Auch hier grenzt Galilei sich durch Salviati ab indem er diesen sagen läßt, daß nicht der Grund der Beschleunigung zur Debatte steht, sondern nur die Eigenschaften der gleichförmig beschleunigten Bewegung ergründet werden sollen. Galilei bleibt auf dem Felde der Kinematik und überläßt die Dynamik seinen Nachfolgern.

Als drittes Thema des Gesprächs wird der Fehler besprochen den Galilei selber begangen hatte indem er zuerst glaubte, daß die Geschwindigkeit einer gleichförmig beschleunigten Bewegung proportional zu den durchlaufenden Strecken wachse.

Schließlich versucht Salviati, Sagredo zu überzeugen, daß die Geschwindigkeit eines Körpers auf einer schiefen Ebene nur von der Höhendifferenz zwischen dem Anfangspunkt der Bewegung und dem augenblicklichen Punkt abhängt. Es wird die Behauptung aufgestellt: "Die Geschwindigkeitswerte welche ein und derselbe Körper bei verschiedenen Neigungen einer Ebene erlangt, sind einander gleich, wenn die Höhen dieser Ebenen gleich sind". Dieser Punkt scheint bei weitem der wichtigste des Gespräches zu sein und kann als zusätzliches Axiom betrachtet werden. Alle Lehrsätze die Galilei mittels dieses Axioms beweist, geben die Möglichkeit seine Theorie auf einfachere Art und Weise experimentell zu überprüfen. Der Grund warum Galiliei diesen Satz in das Gespräch einbaut und ihm damit den Status einer quasi experimentellen Tatsache gibt, die er durch die Beschreibung eines Pendelversuchs mit variablem Aufhängepunkt illustriert, ist sonderzweifel seine Unbeweisbarkeit durch rein kinematische Methoden. Es ist ein Satz der Dynamik der zu seinem Beweis den Energiebegriff voraussetzt.

Der harte Kern von Galilei's Theorie der gleichförmig beschleunigten Bewegung ist in zwei Lehrsätzen formuliert. Sie definieren auf mathematische Art und Weise alle Eigenschaften dieser Bewegungsform. Alle anderen Probleme und Lehrsätze sind nur Konsequenzen dieser beiden Hauptsätze.

Der erste Lehrsatz war schon im Mittelalter unter den Mertonianern bekannt. Er lautet: "Die Zeit, in welcher irgend eine Strecke von einem Körper von der Ruhelage aus mittels einer gleichförmig beschleunigten Bewegung zurückgelegt wird, ist gleich der Zeit, in welcher dieselbe Strecke von demselben Körper zurückgelegt würde mittels einer gleichförmigen

Bewegung, deren Geschwindigkeit gleich wäre dem halben Betrag des höchsten und letzten Geschwindigkeitswertes bei jener ersten gleichförmig beschleunigten Bewegung."

Der Beweis dieses Lehrsatzes bei Galilei ist nicht evident, da er eine gleichförmig beschleunigte Bewegung mit einer gleichförmigen Bewegung vergleichen muß, wobei ein Grenzübergang für beide Bewegungen zu irgend einem Zeitpunkt, während eines gegen Null strebenden Zeitintervalles, notwendig wird. Dadurch kann eine gleichförmig beschleunigte Bewegung dann auf eine gleichförmige zurückgeführt werden, und die beiden werden miteinander vergleichbar. Durch Summierung über unendlich viele unendlich kleine Intervalle, also über eine Integration, können dann die zurückgelegten Strecken berechnet werden.

Der zweite Lehrsatz lautet: "Wenn ein Körper von der Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrate der Zeiten."

Im Gegensatz zum ersten Lehrsatz kann der zweite auf strenge Art im Rahmen der euklidischen Mathematik bewiesen werden. Da nach Lehrsatz 1 jede gleichförmig beschleunigte Bewegung mit einer gleichförmigen Bewegung assimiliert werden kann, besteht der Beweis von Lehrsatz 2 im Vergleich von zwei gleichförmigen Bewegungen, in zwei verschiedenen Zeitintervallen, und der anschließenden Anwendung von Lehrsatz 4 über die gleichförmige Bewegung.

Nach der Einführung dieser Eigenschaften des freien Falles verallgemeinert sie Galilei für die schiefe Ebene durch das Scholium: "Das was für senkrechten Fall bewiesen ist, gilt auch für den in beliebig geneigten Ebenen; in solchen wird die Geschwindigkeit nach demselben Gesetz vermehrt, nämlich dem Wachstum der Zeit gemäß, d.h. wie die Reihe ganzer Zahlen." Galilei leitet nun aus den oben angegebenen Lehrsätzen, dem Scholium sowie den Sätzen über die gleichmäßige Bewegung eine größere Anzahl mechnischer aber auch geometrischer Folgesätze ab, mit welchen das Tatsächliche der Fallbewegung erschöpfend untersucht wird.

Er beweist z.B. daß im Fall der schiefen Ebene, die Beschleunigungen, bezogen auf die Höhe und die Länge, sich umgekehrt proportional wie diese Größen selbst verhalten. Läßt man einen Körper auf der Länge der schiefen Ebene und zugleich einen andern durch die Höhe herabfallen und fragt, welche Wegstücke in gleichen Zeiten von beiden zurückgelegt werden, so findet man die Auflösung sehr einfach indem man von einem Punkt der Senkrechten eine Linie senkrecht zur schiefen Ebene zieht.

Beschreibt man um die senkrechte Kathete des Dreiecks welches mit seiner Hypothenuse die schiefe Ebene darstellt einen Kreis, so sieht man durch geometrische Betrachtung, daß die vom oberen Durchmesserpunkt aus gezogenen Sehnen in jenem Kreis vom fallenden Körper in gleicher Zeit durchfallen werden wie der vertikale Durchmesser selbst.

Es sei zum Schluß noch eine andere Form des zuvor angegebenen Lehrsatzes angeführt. In einer vertikalen Ebene seien, von einem Punkt ausgehend, unter verschiedenen Neigungen Rinnen angebracht. Wenn nun von

diesem Punkt aus schwere Körper gleichzeitig eine Fallbewegung beginnen, so zeigt es sich, daß zur selben Zeit sämtliche Körper stets einen Kreis erfüllen.

Die Wurfbewegung: Vierter Tag der 'Discorsi' (29) (31)

Das Problem der gewaltsamen Bewegung welches am 4. Tag behandelt wird, ist ein wesentlicher Teil von Galilei's Lehre der Bewegung und gerade bei dessen Lösung zeigt sich die fundamentale Richtigkeit seines theoretischen Ansatzes. Dieses Problem hat, wie oben gezeigt, viele mittelalterlichen Naturphilosophen beschäftigt und seine quantitative Lösung wurde zu Galilei's Zeiten, wo die Artillerie im Militärwesen eine immer größere Rolle zu spielen begann, unumgänglich.

Der Text des 4. Tages ist wieder anderer Natur als die mathematische Theorie, welche fast den ganzen 3. Tag ausfüllte. Um den komplexen Fall der Wurfbewegung anzugehen, muß Galilei neue Postulate in seine Theorie einfügen, deren Richtigkeit und Wichtigkeit zu seiner Zeit kaum einleuchteten und die deshalb durch die von ihm mit großer Meisterschaft beherrschte Methode des Gespräches, eingeführt werden müssen. Durch diesen literarischen Kunstgriff wirkt der 4. Tag dann auch viel aufgelockerter als der Dritte. Hinzu kommt noch, daß die mathematischen Ableitungen, auch wenn sie sich vollständig innerhalb der bekannten klassischen Theorie der Griechen bewegen, weniger elegant abgehandelt werden, da Galilei versucht sich ausschließlich auf die "Elemente" des Euklid zu beziehen, anstatt die Bücher des Apollonius zu Grunde zu legen, die er wahrscheinlich nicht gut beherrschte. Bedingt durch diese Umstände ist die von Galilei vorgestellte Theorie der Wurfbewegung, weit weniger abgeschlossen und abgerundet, und sie wird zusätzlich durch geometrische Beweise immer wieder unterbrochen.

Die Postulate die Galilei zusätzlich benötigt um seine am 3. Tag vorgestellte Theorie auf die Wurfbewegung anwenden zu können, sind folgende:

- das Prinzip der Zusammensetzung der Bewegungen
- das Trägheitsprinzip.

Galilei führt das erste Postulat im Gespräch bezeichnenderweise durch Sagredo und nicht durch seinen üblichen Wortführer Salviati ein. Jener sagt am Anfang des 4. Tages, nachdem der erste Lehrsatz über die Bewegung eines geworfenen Körpers auf einer Halbparabel angeführt wurde: "Wahrlich diese Betrachtung ist neu, geistvoll und schlagend; sie stützt sich auf eine Annahme, auf diese nähmlich, daß die Transversalbewegung sich gleichförmig erhalte, und daß ebenso gleichzeitig die natürlich beschleunigte Bewegung sich behaupte, proportional den Quadraten der Zeiten, und daß solche Bewegungen sich zwar mengen, aber nicht stören, ändern und hindern, so daß schließlich bei fortgesetzter Bewegung die Wurflinie nicht entarte; ein mir kaum fassliches Verhalten..."

Das Prinzip der Zusammensetzung der Bewegungen entsprach der Logik der Geometrisierung der Bewegung, eine der hauptsächlichsten Ideen Galilei's. Es war ihm deshalb intuitiv verständlich, denn es geht von der Verall-

gemeinerung gewisser vektorieller und metrischer Eigenschaften des Raumes aus, die dann auf die Kinematik angewendet werden. Ähnliche Gedankengänge wurden von den Mathematikern des 17. Jahrhunderts gepflegt und diese führten dann zur Erfindung der Koordinatenmethode durch Descartes und Fermat. Trotzdem bleibt Galilei's Leistung herausragend, denn es ist wesentlich einfacher die Diagonale eines Rechteckes als eine Art Summe seiner Seiten zu sehen, oder eine Gerade auf zwei verschiedenen Achsen zu projezieren als eine Bewegung in welcher die Zeit eine wesentliche Rolle spielt, als in ähnlicher Art und Weise zusammengesetzt, zu erkennen.

Galilei führt das Trägheitsprinzip ausdrücklich als physikalisches und nicht als kosmologisches Gesetz ein, im Gegensatz zu Descartes, für den es aus metaphysischen Gründen als eine a priori Eigenschaft des Weltganzen gilt. Est gilt nach Galilei nur in einem eng begrenzten irdischen Raum, in dem die Erdkrümmung keine Rolle spielt. Er betrachtet das Trägheitsprinzip ausdrücklich als ein nicht beweisbares Postulat, dessen wissenschaftlicher Wert ausschließlich in den richtigen Resultaten aus seiner Anwendung begründet ist. Eingeführt wird es von Galilei im ersten Abschnitt des 4. Tages in dem er schreibt: "Wenn ein Körper ohne allen Widerstand sich horizontal bewegt, so ist aus allem Vorhergehenden, ausführlich Erörterten bekannt, daß diese Bewegung eine gleichförmige sei und unaufhörlich fortbestehe auf einer unendlichen Ebene..." Diese Formulierung ist eingrenzend, denn sie setzt eine ausschließlich horizontale Trägheitsbewegung voraus, und Galilei besteht darauf an anderen Stellen des Textes sowie auch in den 'Dialogen' zu versichern, daß die Annahme einer geradlinigen unbegrenzten Trägheitsbewegung kosmologisch gesehen unmöglich ist. Diese Eingrenzung führt zu Schwierigkeiten in der Beweisführung der Wurfbewegung. Auch wenn mit dem Trägheitspostulat nach Galilei der 1. Lehrsatz des vierten Tages bewiesen werden kann, so ergeben sich Unstimmigkeiten bei der Behandlung des schiefen Wurfes, so daß Galilei hier keinen Beweis führen kann. Es bleibt Newton vorbehalten das Trägheitsprinzip in voller Allgemeinheit zu formulieren.

Galilei beschreibt die Wurfbewegung mittels fünf Lehrsätzen und neun Problemen. Sie bilden zusammen ein Amalgam aus geometrischen und kinematischen Erkenntnissen, wovon ein Teil durch die aufwendige Beweismethode Galilei's notwendig wird. Seine Hauptresultate sind:

- Ein gleichförmig horizontaler und zugleich gleichförmig beschleunigter Bewegung unterworfener Körper beschreibt eine Halbparabel;
- Ein schief nach oben geworfener Körper beschreibt einen Parabelbogen mit vertikaler Achse;
- Bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit wird die maximale Wurfweite dann erreicht, wenn der Körper unter einem Winkel von 45° gegen die Horizontale geworfen wird;
- Schüsse tragen gleichweit, wenn die Neigungen gleich viel unter oder über einen halben Rechten betragen;
- Bei gegebenen Anfangsgeschwindigkeit gehören zu jedem Schußwinkel eine Höhe sowie eine Tragweite welche tabellarisch berechnet werden können.

Galilei beschließt die eigentlichen 'Discorsi' mit einem Anhang welcher Lehrsätze über den Schwerpunkt fester Körper gibt.

Galilei's wissenschaftliche Methode (15) (18) (33)

Die meisten Untersuchungen über Galilei's wissenschaftliche Methode konzentrieren sich auf seinen "Diaglog die beiden hauptsächlichen Weltsysteme betreffend". Nun benutzte er aber in seinen astronomischen Arbeiten, eine zum Teil andere Denkfigur als diejenige die in den Discorsi zum Ausdruck kommt. Er weiß, daß er Hypothesen in der Astronomie nur indirekt beweisen kann und setzt zu diesem Zwecke zuerst seine Beobachtungen mit dem von ihm erfundenen Teleskop ein. Es wird ihm jedoch bald klar, daß Tycho Brahe's System zu den gleichen Beobachtungen führen müsste und, daß er deshalb andere Gründe für die Bewegung der Erde um die Sonne finden muß. Er glaubt diesen Grund schließlich im Phänomen von Ebbe und Flut aufgespürt zu haben und er wird so zum Propagandist der kopernikanischen Lehre mit allen Konsequenzen die ihm daraus erwachsen. Galilei hat in diesen Überlegungen eine Denkfigur angewendet, die bei Euklid angedeutet und bei Pappus beschrieben wird, um dann ihren Triumph bei Descartes in seiner "Geometrie" zu feiern. Die Denkfigur der Analysis geht davon aus, daß eine Hypothese als wahr angenommen wird und progressiv aus ihr Konsequenzen abgeleitet werden, die ebenfalls auf ihren Wahrheitsgehalt geprüft werden bis man auf eine evidente Tatsache stößt, deren Wahrheit unmittelbar einleuchtend ist. In diesem Falle, und unter Voraussetzung, daß die Ausgangshypothese keine anderen, mit den ersten Ableitungen in Widerspruch stehende Tatsachen abzuleiten erlaubt, ist diese Ausgangshypothese bewiesen und der Beweis ist die Umkehrung der Analyse. Galilei sagt am ersten Tag des Dialogo: "Ich bin überzeugt, daß er zuerst mit Hilfe der Sinne, der Experimente und Beobachtungen soviel Gewissheit wie möglich für seinen Schluß erlangte, und nachher nach Mittel suchte sie zu beweisen. Denn, das ist der normale Verlauf in den demonstrativen Wissenschaften; man folgt ihm, denn wenn der Schluß richtig ist, wird man bei Anwendung der resolutiven Methode (d.h. die Methode der Analyse des Pappus) auf eine bereits erwiesene Voraussetzung stoßen oder zu einem Prinzip kommen, das per se bekannt ist. Wenn aber der Schluß falsch ist, so wird man endlos weitergehen können, ohne jeweils auf eine schon bekannte Wahrheit zu treffen; man begegnet höchstens einer Unmöglichkeit, einer offenbaren Absurdität (5).

In den 'Discorsi' jedoch, sonder Zweifel bedingt durch die Ablehnung seiner Methode durch die kirchlichen Autoritäten, geht Galilei auf eine ganz andere Art und Weise vor. Gleich am ersten Tag legt Galilei Gewicht auf die Tatsache, daß er die zwei neuen Wissenschaften ausschließlich auf klare und einleuchtende Prinzipien gründet und nach der geometrischen Methode verfahren wird. Er sieht in diesem Vorgehen das fundamentale Neue seiner Arbeiten.

So gibt Galilei, wie oben ausgeführt wurde, am Anfang seiner Abhandlung über die Bewegung zuerst die Kriterien an, welcher seiner ersten

Prinzipien zu genügen haben. Sie müssen dem Verstande klar und einleuchtend erscheinen und experimentell nachprüfbar sein. Nun ist aber Galilei's erstes Prinzip der Bewegungslehre, daß schwere Körper in gleichen Zeiten über gleiche Strecken fallen, alles andere als direkt einleuchtend, so wie es sein eigenes Zögern über die endgültige Fassung ($v \sim s$ oder $v \sim t$) hinreichend beweist. Es ist jedoch experimentell nachvollziehbar, wenn man wie Galilei vorschlägt, "unwichtige" versuchsbedingte Komplikationen ausklammert. Dagegen ist die Aussage, daß die Geschwindigkeiten gleich sind, nur indirekt durch die Beobachtung der Pendelbewegung verifizierbar. Keine der beiden Aussagen ist direkt beweisbar und Galilei konnte schlussendlich deren Richtigkeit nur über den Wahrheitsgehalt der aus diesen Prinzipien abgeleiteten Lehrsätze bestätigen.

Vielleicht aus diesem Grunde führt er am dritten Tage eine neue methodologische Erklärung seines Vorgehens ein, welche die Hypothese an den Anfang setzt die dann durch deduktives Schließen und experimentelle Bestätigung indirekt verifiziert sind. Diese Methode ähnelt der in dem Dialogo angewandten. Galilei geht von der kinematischen Definition der Spirale durch Archimedes (4) aus und argumentiert, daß obgleich diese Bewungsart in der Natur nicht vorkommt, trotzdem die mittels dieser Definition abgeleiteten Sätze, unbedingt wahr seien. Diese Denkfigur bezeichnet er als 'Ableitung ex suppositione' und er weist auf ihr Vorkommen schon bei Aristoteles hin (32). Abstrakt ausgedrückt geht Galilei's Überlegung in folgender Weise:

wenn q (physikalisch-mathematischer Sachverhalt) dann;
wenn q dann p (durch mathematische Beweisführung)
dann p (physikalische Bestätigung).

Damit wird Galilei's Verdienst, in seinen eigenen Augen, unabhängig von der realen Existenz einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung in der Natur, genau wie des Archimedes Sätze über die Spirale auch ohne eine Bewegung dieser Art bestehen. Er hat jedoch im Gegensatz zu Archimedes eine experimentelle Bestätigung seiner Theorie besonders durch seine Messungen der Bewegungen auf der schiefen Ebene (10), so daß seine Bewegungslehre eine zusätzliche Überlegenheit über die Mathematik der Alten besitzt und grundlegend neue Wege eröffnet.

Galilei's wissenschaftliche Methode die er bei der Ableitung seiner zwei neuen Wissenschaften anwendet, hat keine Verwandtschaft mit dem modernen Vorgehen, aus Hypothesen Konsequenzen abzuleiten, die durch das Experiment bestätigt werden müssen. Er war unfähig Prinzipien von deduktiven Wissenschaften anders als unmittelbar wahr und einleuchtend anzusehen, und konnte sie sich nicht als hypothetisch vorstellen. Das weist Galilei als Platoniker aus, für den das Ideal der Akzeptanz der Grundlagen einer Wissenschaft in ihrer unmittelbaren Wesensschau besteht, und nicht in ihrer mittelbaren Bestätigung durch das Experiment. Daß er selbst in den Discorsi dieses Ideal nicht erreicht hat, darin liegt ein Hauch von Tragik.

BENUTZTE LITERATUR

a) Werke Galilei's

(1) Le Opere di Galileo Galilei. - *Ed. Antonio Favaro 1890-1909/1968.*

(2) Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend (Discorsi) übersetzt von A. von Oettingen. - *Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1964.*

(3) Dialogues concerning two new sciences, translated by Henry Crew & Alfonso de Salvio. - *Dover Books, 1954.*

(4) Discours concernant deux sciences nouvelles, traduction et notes de M. Clavelin. - *A. Colin, 1970.*

(5) Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme, übersetzt von E. Strauss 1891. - *Nachdruck Teubner Stuttgart 1982.*

(6) Dialogues et lettres choisies. Trad. PM Michel. - *Hermann 1966.*

(7) Schriften, Briefe, Dokumente. - *Hg. Anna Mudrey. Beck 1987.*

b) Biographien

(8) L. Geymonat: Galilée, Laffont 1968
(9) B. Kouznetsov: Galilée, Mir 1973
(10) St. Drake: Galilée, Actes Sud 1986
(11) A. Fölsing: Galileo Galilei; Prozess ohne Ende;, Piper 1983
(12) R. Krämer-Badoni: Galileo Galilei; Herbig 1983
(13) K. Fischer: Galileo Galilei; Beck 1983

c) Sekundarliteratur

(14) Archimedes: Werke, ed. Heiberg/Zeuthen. - *Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1972.*

(15) R.E. Butts & J.C. Pitt: New Perspectives on Galileo. - *R. Reidel, 1978.*

(16) J.G. Campbell: Galilée et la culture scientifique d'aujourd'jui. - *In (30).*

(17) M. Clavelin: La philosophie naturelle de Galilée. - *A. Colin, 1970.*

(18) A.C. Crombie: Von Augustinus bis Galilei; Die Emanzipation der Naturwissenschaft. - *Kiepenheuer & Witsch 1965.*

(19) E.J. Dijksterhuis: Die Mechanisierung des Weltbildes. - *Springer Reprint 1983.*

(20) P. Duhem: Sur la notion de la théorie physique de Platon à Galilée. - *Vrin Reprise 1982.*

(21) P. Duhem: Ziel und Struktur der physikalischen Theorien. - *F. Meiner 1978.*

(22) Euklid: Die Elemente. - *Ed. Heiberg/Thaer. Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1980.*

(23) A. Koyré: Etudes galiléennes. - *Hermann, nouveau tirage 1980.*

(24) A. Koyré: Galilée et Platon, in: Etudes d'histoire de la pensée scientifique. - *Gallimard 1973.*

(25) A. Koyré: J.B. Benedetti: Critique d'Aristote, in: Etudes d'histoire de la pensée scientifique. - *Gallimard 1973.*

(26) A. Koyré: Le De Motu Gravum de Galilée, in: Etudes d'histoire de la pensée scientifique. - *Gallimard 1973.*

(27) E. Mach: Die Mechanik, historisch-kritisch dargestellt. - *Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1963.*

(28) E. Mc Mullin: The Conception of Science in Galileo's Work, in (15).

(29) J. Merleau-Ponty: Leçons sur la genèse des théories physiques. - *Vrin 1974.*

(30) Galileo Galilei: 350 ans d'histoire 1633-1983. Ed. Mgr P. Poupard. -*Desclée International 1983.*

(31) P. Thullier: De l'art à la science, la découverte de la trajectoire parabolique. - *La Recherche, sept. 1987.*

(32) W.A. Wallace: Prelude to Galileo. *Reidel 1981.*

(33) W.L. Wisan: Galileos Scientific Method: a reexamination. - *In (15).*

Adresse de l'auteur:

Prosper Schroeder
119, avenue Gaston-Diderich
L - 1420 Luxembourg