Einiges aus dem Gebiete der Dynamik.

Während der Grundstein zur Statik fester und flüssiger Körper bereits im Alterthum gelegt worden war und die Mathematiker der Neuzeit den beinahe zwei Jahrtausende ruhenden Bau wieder aufnahmen und der Vollendung entgegenführten, wurden für die Bewegungslehre die Bausteine erst von den modernen Mechanikern gesammelt und zu einem Ganzen zusammengefügt. Der Grund des Misslingens so vieler Versuche der Alten, eine wissenschaftliche Theorie der Mechanik aufzustellen, lag nicht in der Vernachlässigung der Beobachtungen und Erfahrungen. Denn Aristoteles betrat im Gegensatz zu seinen Vorgängern gerade darin einen neuen Weg, dass er die Erfahrung als Grundlage einer Theorie betrachtete und der Ansicht war, dass erst aus der Sammlung von einzelnen Thatsachen allgemeine Principien durch Induction abzuleiten sind. Der eigentliche Fehler der Naturphilosophie der Griechen bestand in dem Mangel an solchen Ideen, die sich den reellen äusseren Erscheinungen in der Natur anpassen, in der Sucht zu schematisiren und die gewöhnlichen Worte der Sprache und die innere Verbindung dieser Worte über die Herrschaft der äusseren Thatsachen zu erheben. Fast alle Lösungen mechanischer Probleme dienten mehr einer zugespitzten Schärfung des Sprachgebrauchs als dem eigentlichen naturphilosophischen Interesse und streiften auf diese Weise der Methode nach völlig an die Scholastik. In der Einleitung zu seiner „Physik“ sagt z. B. Aristoteles[1]): „Wir müssen von dem Allgemeinen zum Besonderen fortschreiten; einiges von diesem Allgemeinen finden wir schon in unserer Sprache, denn die Wörter bezeichnen die Dinge in ihrer allgemeinen und unbegrenzten Form, wie dies z. B. bei dem Worte Kreis der Fall ist, die Begriffsbestimmung zerlegt ihn in das Einzelne, was in diesem Allgemeinen eingeschlossen ist. Auf dieselbe Art“, fährt er fort, „nennen die Kinder anfangs alle Männer Vater und alle Weiber Mutter, und später erst lernen sie beides unterscheiden.“

---

[1]) Aristotelis opera omnia, Parisiis 1850, vol. II, pag. 248. *Διὸ ἐκ τῶν καθόλου ἐπὶ τὰ καθ' ἕκαστα δεῖ προϊέναι.*

Πέπονθε δὲ ταὐτὸ τοῦτο τρόπον τινὰ καὶ τὰ ὀνόματα πρὸς τὸν λόγον. Ὅλον γάρ τι καὶ ἀδιορίστως σημαίνει, οἷον ὁ κύκλος· ὁ δὲ ὁρισμὸς αὐτοῦ διαίρει εἰς τὰ καθ' ἕκαστα. Καὶ τὰ παιδία δὲ τὸ μὲν πρῶτον προσαγορεύει πάντας τοὺς ἄνδρας πατέρας καὶ μητέρας τας γυναῖκας, ὕστερον δὲ διορίζει τούτων ἑκάτερον.

Dieser Ansicht gemäss beginnt er nun damit, mehrere von den Fragen über das Universum aufzustellen, welche die scharfsinnigsten Männer vor ihm anhaltend beschäftigt hatten, und betrachtet die Worte und Ausdrücke, mit welchen diese Männer die allgemeinsten Begriffe der Dinge und ihrer Verhältnisse zu einander bezeichnet hatten. Bei der Discussion der Frage, ob es einen leeren Raum gebe oder nicht, geht er davon aus, in welchem Sinne wir zu sagen pflegen, dass irgend ein Ding in einem andern enthalten sei[2]), und entscheidet sich aus folgenden Gründen für das Nichtvorhandensein eines leeren Raumes[3]): „Im leeren Raume", sagt er, „kann es keinen Unterschied zwischen Oben und Unten geben; denn da bei einem Nichts kein Unterschied sein kann, so kann auch keiner bei einer blossen Negation existiren; der leere Raum ist aber eine blosse Negation der Materie, also würden sich in einem leeren Raume die Körper weder auf- noch abwärts bewegen, was sie doch ihrer Natur nach thun müssen."

Eine andere dem Aristoteles sehr geläufige Art zu argumentiren besteht in der Antithese der Wörter, und darauf gründet sich auch seine Unterscheidung der Bewegung in eine „gewaltsame" und „natürliche"[4]). Ein Körper, der auf horizontaler Unterlage fortgeschleudert wird, bewegt sich immer langsamer und hört endlich ganz auf sich zu bewegen, weil, nach Aristoteles, seine Bewegung eine gewaltsame ist. Ein freifallender Körper bewegt sich immer schneller, weil, wie Aristoteles will, seine Bewegung eine natürliche ist.

Bei der Erklärung, die Aristoteles vom Steigen und Fallen der Körper giebt, geht er von dem Princip aus, dass jedes Ding den ihm von der Natur angewiesenen Ort aufsuche[5]), und behauptet, dass von seinen vier bekannten Elementen das Feuer „absolut leicht" sei, weil es sich immer über die drei übrigen Elemente erheben wolle, und dass die Erde „absolut schwer" sei, weil sie ihre Stelle immer unter den drei anderen Elementen einzunehmen strebe[6]). Aristoteles nimmt das Wort „leicht" blos im Gegensatze zu dem Worte „schwer" und betrachtet das, was er „Leichtigkeit der Körper" nennt, als eine diesen Körpern inhärirende Eigenschaft. Wenn er zu Anfang des VII. Buches seiner „Physik" sagt[7]): „Alles, was bewegt wird, muss nothwendig von

---

[2]) Natur. auscult. lib. IV, cap. III. vol. II, pag. 287. *Μετὰ δὲ ταῦτα ληπτέον ποσαχῶς ἄλλο ἐν ἄλλῳ λέγεται.*

[3]) Ibid. pag. 294. *ἡ μὲν γὰρ ἄπειρον, οὐδὲν ἔσται ἄνω οὐδὲ κάτω οὐδὲ μέσον · ἡ δὲ κενόν, οὐδὲν διαφέρει τὸ ἄνω τοῦ κάτω · ὥσπερ γὰρ τοῦ μηδενὸς οὐδεμία ἐστὶ διαφορά, οὕτως καὶ τοῦ μὴ ὄντος. Τὸ δὲ κενὸν μὴ ὄν τι καὶ στέρησις δοκεῖ εἶναι. ἡ δὲ φύσει φορὰ διάφορος · ὥστ' ἔσται τὰ φύσει διάφορα. Ἢ οὖν οὐκ ἔστι φύσει οὐδαμοῦ οὐδενὶ φορά, ἢ εἰ τοῦτ' ἔστιν, οὐκ ἔστι κενόν.*

[4]) Ibid. pag. 294. *Πᾶσα κίνησις ἢ βίᾳ ἢ κατὰ φύσιν.*

[5]) Ibid. lib. VIII, cap. IV. vol. II, pag. 348. *Ταῦτα (τὰ κοῦφα καὶ τὰ βαρέα) εἰς μὲν τοὺς ἀντικειμένους τόπους βίᾳ κινεῖται, εἰς δὲ τοὺς οἰκείους, τὸ μὲν κοῦφον ἄνω, τὸ δὲ βαρὺ κάτω, φύσει.*

pag. 349. *Καίτοι τοῦτο ζητεῖται, διὰ τί ποτε κινεῖται εἰς τὸν αὐτῶν τόπον τὰ κοῦφα καὶ τὰ βαρέα. Αἴτιον δ' ὅτι πέφυκέ ποι, καὶ τοῦτ' ἔστι τὸ κούφῳ καὶ βαρεῖ εἶναι, τὸ μὲν τῷ ἄνω, τὸ δὲ τῷ κάτω διωρισμένον.*

[6]) De coelo, lib. IV, cap. I. vol. II, pag. 424. *Ἁπλῶς μὲν οὖν κοῦφον λέγομεν τὸ ἄνω φερόμενον καὶ πρὸς τὸ ἔσχατον, βαρὺ δὲ τὸ ἁπλῶς κάτω καὶ πρὸς τὸ μέσον.*

[7]) vol. II, pag. 333. *Ἅπαν τὸ κινούμενον ἀνάγκη ὑπό τινος κινεῖσθαι.*

Etwas bewegt werden", so verlegt er alle Vorgänge und Veränderungen an den Körpern in deren inneres unbekanntes Wesen und schafft sich selbst auf diese Weise ein geheimnissvolles Ding an sich. „Wenn die Hand", sagt er z. B. Phys. Ausc. VIII, 10, „die den Stein vorwärts stösst, die Ursache der Bewegung des Steines ist, wie kann dieser, sobald er die Hand verlassen hat, sich überhaupt noch bewegen? Und wenn er sich doch noch bewegt, warum nicht immerfort?" Er beantwortet diese Frage auf folgende Weise: „Bei dem Wurfe des Steines wird der Luft eine Bewegung mitgetheilt, deren einzelne Theile den Stein vorwärts treiben; und so wirkt jedes Lufttheilchen auf den Stein, bis er zu solchen Lufttheilchen kommt, die nicht mehr auf ihn wirken, weil auch die anfängliche Bewegung des Steines nicht mehr auf diese Lufttheilchen wirkt[8])."

Einer der bei dem Wiederaufleben der Naturwissenschaften am heftigsten angegriffenen und am hartnäckigsten vertheidigten Sätze des Aristoteles ist der, „dass derjenige Körper der schwerere ist, der bei gleichem Inhalt schneller abwärts geht"[9]), oder, wie es an einer anderen Stelle noch deutlicher ausgedrückt ist, „dass die Körper genau in demselben Verhältniss schneller fallen, als ihr Gewicht zunimmt"[10]). Diese Sätze, welche sich streng an das Mass der dem Aristoteles vorliegenden Erfahrungen halten, die unbestimmte und durch Nichts begründete Unterscheidung zwischen natürlicher und unnatürlicher Bewegung, konnten unmöglich zu irgend einer wahrhaft wissenschaftlichen Erkenntniss und zur Auffassung eines wahren mechanischen Princips führen. Statt Ruhe und Bewegung direkt, bestimmt und mit Beziehung auf ihre Ursache, die wir jetzt Kraft nennen, zu betrachten, suchte er unter ganz anderen Ideen herum, die er mit den Thatsachen in keine enge Verbindung bringen konnte, wie z. B. unter den wunderbaren Eigenschaften des Kreises und unter den unbestimmten Begriffen von „seltsam und gewöhnlich", von „natürlich und unnatürlich". Aber auch die nach ihm benannte Schule im Mittelalter fiel in die alten Wortgrübeleien zurück und verwarf alles das, was sich

---

[8]) Mechanica, cap. XXXIV. vol. IV, pag. 73. *Διὰ τί φέρεταί τι οὐ τὴν αὑτοῦ φοράν, μὴ ἀκολουθοῦντος καὶ ὠθοῦντος τοῦ ἀφέντος; Ἢ δῆλον ὅτι ἐποίησε τοιοῦτον τὸ πρῶτον ὡς θάτερον ὠθεῖν, καὶ τοῦθ' ἕτερον; παύεται δέ, ὅταν μηκέτι δύνηται ποιεῖν τὸ προωθοῦν τὸ φερόμενον ὥστ' ὠθεῖν, καὶ ὅταν τὸ τοῦ φερομένου βάρος ῥέπῃ μᾶλλον τῆς εἰς τὸ πρόσθεν δυνάμεως τοῦ ὠθοῦντος.*

Natur. auscult. lib. VIII, cap. X. vol. II, pag. 365. *Εἰ γὰρ πᾶν τὸ κινούμενον κινεῖται ὑπὸ τινός, ὅσα μὴ αὐτὰ ἑαυτὰ κινεῖ, πῶς κινεῖται ἔνια συνεχῶς μὴ ἁπτομένου τοῦ κινήσαντος; οἷον τὰ ῥιπτούμενα.*

Ἀνάγκη δὴ τοῦτο μὲν λέγειν, ὅτι τὸ πρῶτον κινῆσαν ποιεῖ οἱόντε κινεῖν, ἢ τὸν ἀέρα τοιοῦτον ἢ τὸ ὕδωρ ἤ τι ἄλλο τοιοῦτον ὃ πέφυκε κινεῖν καὶ κινεῖσθαι.

Παύεται δέ, ὅταν ἐλάττων ἡ δύναμις τοῦ κινεῖν ἐγγένηται τῷ ἐχομένῳ. Τέλος δὲ παύεται, ὅταν μηκέτι ποιήσῃ τὸ πρότερον κινοῦν, ἀλλὰ κινούμενον μόνον. Ταῦτα δ' ἀνάγκη ἅμα παύεσθαι, τὸ μὲν κινοῦν, τὸ δὲ κινούμενον, καὶ τὴν ὅλην κίνησιν.

Ibid. lib. IV, cap. VIII. vol. II, pag. 295. *Ἔτι νῦν μὲν κινεῖται τὰ ῥιπτούμενα, τοῦ ὤσαντος οὐχ ἁπτομένου, ἢ δι' ἀντιπερίστασιν, ὥσπερ ἔνιοί φασιν, ἢ διὰ τὸ ὠθεῖν τὸν ὠσθέντα ἀέρα θάττω κίνησιν τῆς τοῦ ὠσθέντος φορᾶς, ἣν φέρεται εἰς τὸν οἰκεῖον τόπον.*

[9]) De coelo, lib. IV, cap. I. vol. II, pag. 424. *Πρὸς ἄλλο δὲ κοῦφον καὶ κουφότερον, ὃ δυοῖν ἐχόντων βάρος καὶ τὸν ὄγκον ἴσον κάτω φέρεται θάτερον φύσει θᾶττον.*

[10]) De coelo, lib. III, cap. II. vol. II, pag. 414. *Τὸ γὰρ τάχος ἕξει τὸ τοῦ ἐλάττονος πρὸς τὸ τοῦ μείζονος ὡς τὸ μεῖζον σῶμα πρὸς τὸ ἔλαττον.*

aus den von Aristoteles aufgestellten Sätzen (d. h. so weit eben die Erfahrungen seiner Zeit reichten) nicht ableiten liess oder gar mit ihnen im Widerspruch stand. Ja selbst an der Grenzscheide des Mittelalters und der neueren Zeit war man noch nicht zur vollen Trennung von Kraft und Körper, Erscheinung und Ursache gelangt. So behielt Cardanus in seinem Buche: „Opus novum de proportionibus numerorum, motuum, ponderum, sonorum aliarumque rerum" die Aristotelische Eintheilung der Bewegung bei und fügte als Verbesserung noch eine dritte Art der Bewegung, die willkürliche, hinzu[11]). Er unterschied die willkürliche Bewegung, die gleichförmig im Kreise vor sich geht und die den himmlischen Körpern eigen sein soll; die natürliche, die in ein und demselben Medium gegen das Ende schneller wird, wie z. B. die Bewegung der fallenden Körper, die in einer geraden Linie vor sich geht[12]), weil sie die Bewegung nach einem bestimmten Ziele hin ist und die Natur auf der geraden Linie am schnellsten ihren Zweck erreicht; und endlich drittens die gewaltsame Bewegung, die gegen das Ende hin immer langsamer wird. Nach Cardanus geht ein Körper aus vier Ursachen eine natürliche Bewegung ein[13]):

1. wegen der Grösse des Gewichts,
2. wegen des geringen Widerstandes des Mittels,
3. wegen des Stosses der ihm folgenden Lufttheilchen,
4. weil er nicht gehindert wird durch eine seitliche Bewegung der Lufttheilchen.

Ferner schreibt Cardanus dem ruhenden Körper eine natürliche verborgene Bewegung zu, durch welche er einer ihm mitgetheilten Bewegung im Anfange grossen Widerstand leistet[14]). Wollte man darin schon den Keim von dem erst nach seiner Zeit aufgestellten und zur vollen Klarheit gelangten Trägheitsgesetz der Körper entdeckt zu haben glauben, so würde man dem Autor bei seinem Befangensein in Aristotelischen Begriffen und in der dogmatischen Schulweisheit des Mittelalters offenbar Unrecht thun.

---

[11]) Cardani opus novum, prop. 25. Tres sunt omnino simplices, naturalis, voluntarius et violentus.
prop. 29. Omnis motus voluntarius aequalis est semper.
prop. 30. Omnis motus naturalis in aequali medio validior est in fine quam in principio: violentus contra.

[12]) Ibid. prop. 23. Omnis motus naturalis ad locum suum est; ideo per rectam lineam fit.

[13]) Ibid. prop. 65.

1. quod gravius est, celerius descendit,
2. quanto medium est rarius et mobile tenuius, tanto celerius descendit,
3. mobile semper descendit parte acutiore supraposita, ne aër cogatur celerius ferri,
4. ideo levia mobilia et magna non solum lentius descendunt, quoniam parvam vim habeant et magnam repugnantiam, sed quia transversim impulsa minus moventur motu recto.

[14]) Ibid. prop. 38. Corpus movetur occulto motu quiescendo.

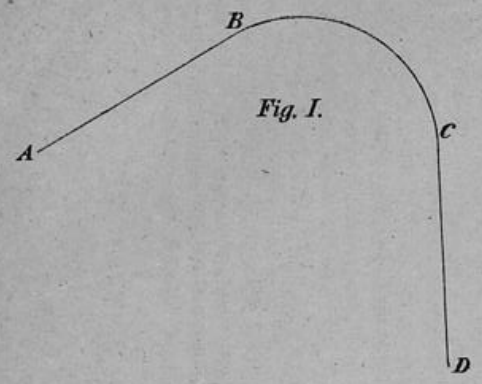


Fig. I.

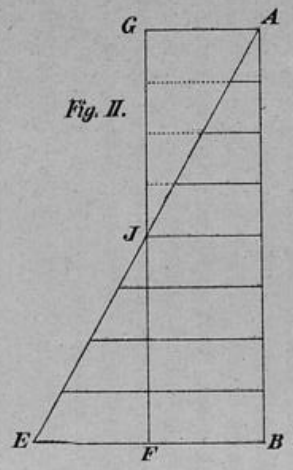
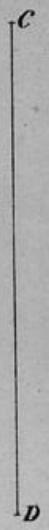


Fig. II.



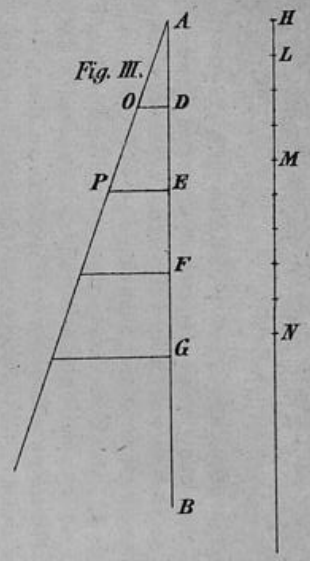


Fig. III.

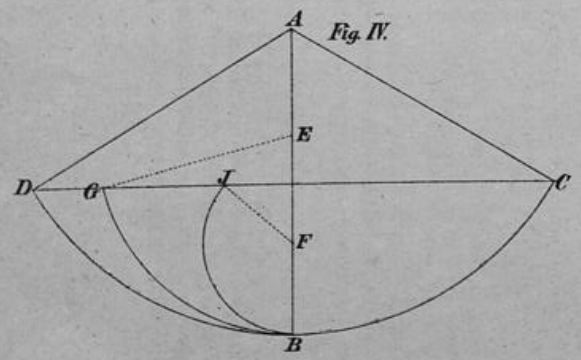


Fig. IV.

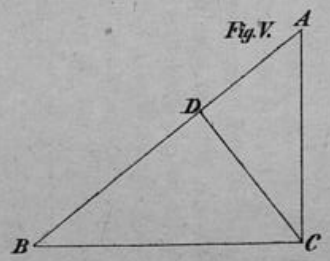


Fig. V.

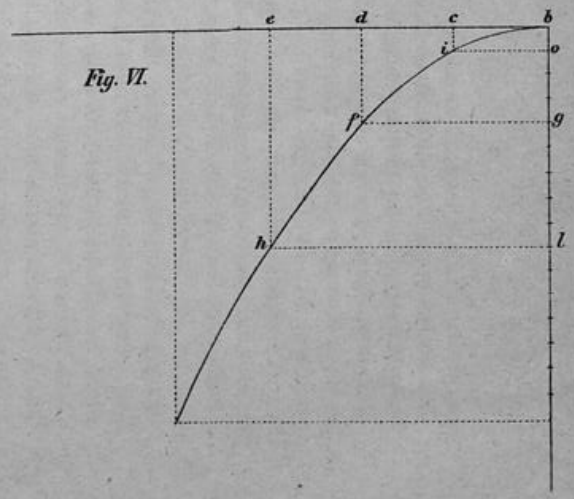


Fig. VI.

Tartalea (1506—1559), ein Zeitgenosse von Cardanus, der die von Aristoteles eingeführte Eintheilung der Bewegung beibehielt, drückte in seinem im Jahre 1537 erschienenen Werke: „Nova scientia" einen seiner Sätze mit folgenden Worten aus[15]): „Je mehr ein schwerer Körper von dem Anfange seiner Bewegung sich entfernt oder je näher er dem Ende seiner gewaltsamen Bewegung kommt, desto langsamer und träger bewegt er sich."

In demselben Werke stellte er die Hypothese auf, dass ein geworfener Körper zuerst eine gerade Linie AB (Fig. I.) beschreibe, darauf in einem Kreisbogen BC weiter gehe und endlich am Ende seiner gewaltsamen Bewegung in die natürliche übergehend in einer geraden Linie D senkrecht abwärts falle[16]). Tartalea giebt zwar zu, dass in Folge der Kraft, die den Körper nach dem Erdmittelpunkt ziehe, die Bahn einer gewaltsamen Bewegung niemals vollkommen gerade sein könne; er wolle aber denjenigen Theil, wo die Abweichung eine sehr geringe, als gerade, und denjenigen Theil, wo die Krümmung evident sei, als Stück eines Kreisbogens voraussetzen. Der Punkt C, von welchem die natürliche Bewegung beginne, sei zugleich vom Anfangspunkte A der gewaltsamen Bewegung am weitesten entfernt. Wenn er nun weiter angiebt, dass jener Punkt C unter Voraussetzung derselben bewegenden Kraft die grösste Entfernung von A hat, wenn der Neigungswinkel, unter welchem der Körper geworfen wird, 45 Grad beträgt[17]), so kann dies nur für eine glückliche Eingebung angesehen werden, da sein beigebrachter Beweis höchst mangelhaft ist und nicht zwingende Kraft besitzt. Daniel Santbech, dessen Werk: „Problematum astronomicorum et geometricorum sectiones VII" im Jahre 1561 erschien, stellte die Behauptung auf, dass ein mit grosser Geschwindigkeit geworfener Körper in einer geraden Linie so lange fortgehe, bis seine Geschwindigkeit ganz erschöpft sei, und dann senkrecht herabfalle. Allerdings geht er von der Ansicht aus, dass der aufwärts geworfene Körper, ehe er senkrecht zur Erde falle, in einer mehrmals gebrochenen Linie gleichsam ruckweise immer ein Stück abwärts falle; allein diese gebrochene Linie weiche sehr wenig von einer geraden ab[18]).

---

[15]) Nova scientia inventa da Nic. Tartalea, lib. I, prop. 3. Quanto piu un corpo egualmente grave se andara lantanando dal suo principio over propinquando al suo fine nel moto violente, tanto piu andara pigro e tardo.

[16]) Nova scientia, lib. II, suppos. II. Ogni transito over moto violente de corpi egualmente gravi che sia fuora della perpendicolar de l'orizonte sempre sara in parte retto e in parte curvo, e la parte curva sara parte d'una circonferentia di cerchio.

[17]) Ibid. lib. II, prop. 8. Se una medema possanza movente ejettara over tirara corpi egualmente gravi simili e eguali in diversi modo violentemente per aere, quello che fara il suo transito elevato a 45 gradi sopra a l'orizonte fara (etiam) il suo effetto piu lontan dal suo principio sopra il pian de l'orizonte che in qualunque altro modo elevato.

[18]) Probl. astronom. lect. VI. Ex his alter triangulus ὀρθογώνιος constituitur ex tribus lineis, quarum prima est hypotenusa tormenti, seu via, quam sphaera e principio seu loco suo violentissimo motu expulsa in illud punctum usque ex quo versus terram delabitur percurrit. Hanc vero exquisitissime adaequari rectae lineae consentaneum non est, quamvis utriusque differentia non sit magna. Neque enim violentus ille motus quo sphaera impulsa defertur in temporis momento ita abrumpitur ut statim ex praecipitio sphaera in terram devolvatur, sed paulatim in itinere elanguescit, donec tandem in fine cursus omnino deficiat et

Santbech scheint demnach die Zusammensetzung der Wirkung der Schwere mit der des ersten Impulses nicht begriffen zu haben, indem er die Schwerkraft nur stossweise oder abwechselnd wirken lässt, während Tartalea die Schwere als eine Kraft betrachtete, welche die Kugel in jedem Punkte ihrer Bahn von ihrer Richtung ablenkt.

Der gemeinschaftliche Fehler aller Schriftsteller dieser Zeit war, dass sie für die Bewegung eines Körpers die fortdauernde Wirkung einer Kraft als nothwendig voraussetzten und das allmälige Abnehmen der Geschwindigkeit dem Körper selbst zuschrieben, statt es dem Widerstande der umgebenden Luft beizumessen. Erst seit Benedetti (1530—1590) begannen richtigere Ansichten über die Bewegung in den besseren Köpfen sich zu regen und nach und nach Klarheit und Festigkeit anzunehmen. Derselbe scheint der Autorität des Aristoteles blindlings und ohne Prüfung nicht mehr sich fügen zu wollen; denn in seinem: „Diversarum speculationum math. et phys. liber (1585)" erklärt er sich gegen die Ansicht des Aristoteles, nach welcher der geworfene Stein durch die Luft getrieben werde, und setzt hinzu, dass der Stein durch die Luft mehr gehindert als angetrieben werden müsse[19]), und dass die Bewegung des Steins, nachdem er die werfende Hand verlassen, von einer gewissen Impression (ex impetuositate) komme, die der Stein von der ersten bewegenden Kraft bekommen habe. Bei den natürlichen Bewegungen des frei fallenden Körpers nimmt diese „Impetuosität" mehr und mehr zu, weil die Ursache derselben, nämlich die Neigung des Körpers den ihm von der Natur angewiesenen Platz aufzusuchen, ebenfalls immerfort vorhanden ist. Wenn Benedetti nun an einer andern Stelle sagt, dass der Körper, wenn er durch eine Schleuder herumgedreht wird, in einer geraden Linie fortzugehen strebe[20]), so war er auf dem besten Wege das erste Gesetz der Bewegung, das der Trägheit, zu entdecken. Ja, es scheint die Vermuthung Montucla's, dass Benedetti's richtige Ansichten über gewisse Dinge in der Mechanik die Quelle waren, aus welcher Stevin und Galilei geschöpft haben, nicht ganz unberechtigt zu sein.

Zwanzig Jahre später widerlegte Stevin auf dem Wege des Versuchs in seinem: „Appendix statices, ubi inter alia errores quidam *στατικῶν Ἰδιωμάτων*

---

evanescat. Quamvis igitur non exacte rectam lineam sphaera percurrat, tamen in ipsis elevationibus tormenti ut hypotenusam loco rectae lineae accipiamus est necesse.

Secunda linea est quam sphaera metitur, cum deficiente violento motu nativo impetu in terram ad rectos angulos delabitur.

Tertia vero linea trigoni nimirum basis ipsa constat illa distantia quae inter locum tormenti et cathetum intercipitur, quae horizontis planae superficiei semper aequidistat.

[19]) Benedetti, speculationum liber, pag. 184. Aër non solum hoc corpus non impellit, sed potius id cohibet a motu. Hujusmodi igitur corporis separatim a primo movente velocitas oritur a quadam naturali impressione, ex impetuositate recepta a dicto mobili, quae impressio et impetuositas in motibus rectis naturalibus continuo crescit, cum perpetuo in se causam moventem, id est propensionem eundi ad locum ei a natura assignatum, habeat.

[20]) Benedetti, speculat. liber, pag. 160. Qui quidem motus in orbem, ut circumagatur etiam ipsum corpus, cogit, quod quidem corpus, naturali quadam inclinatione, exiguo quodam impetu jam incepto, vellet recta iter peragere.

refelluntur (1605)" die Behauptung des Aristoteles, dass die Geschwindigkeiten fallender Körper im Verhältniss ihrer Gewichte stehen. Er liess mit Joh. Grotius zwei Bleikugeln, von denen die eine zehnmal schwerer war als die andere, von einer Höhe von 30 Fuss auf eine harte Unterlage fallen und fand, dass beide Kugeln zu gleicher Zeit auffielen, da der Schall der auffallenden Kugeln ein und derselbe zu sein schien[21]). Eine Abweichung von dieser Regel schrieb er dem Widerstande der Luft zu, der in der Berührung derselben mit der Oberfläche des Körpers seinen Ursprung habe.

§ 1. Trägheitsprincip.

Während die Mathematiker vor Galilei nur schüchterne Versuche machten sich der starren Fesseln, die ihnen die dogmatische Schulweisheit des Mittelalters angelegt hatte, zu entledigen und nur schwer sich mit dem Gedanken vertraut machen konnten, dass die Geschwindigkeit eines in Bewegung begriffenen Körpers in Folge der auf ihn einwirkenden Ursachen zu- oder abnehme, und dass die immer langsamere Bewegung der geworfenen Körper von äusseren Einwirkungen, dem Widerstande der Luft, der Reibung u. a. mehr, herrühre, nicht aber in ihnen selbst zu suchen sei, — trat Galilei mit freiem Muthe und offener Stirn zweien der mächtigsten Vorurtheile seiner Zeit, einem kirchlichen und einem philosophischen, entgegen. In Folge seiner unerschrockenen Vertheidigung des Kopernikanischen Weltsystems war er der Verfolgungswuth der Geistlichkeit ausgesetzt; den Starrsinn der Gelehrten bekämpfte er, indem er mit beissendem Spott den sogenannten „Buchphilosophen" zu Leibe ging. In einem Briefe an Kepler über die von ihm entdeckten Jupiter-Trabanten schreibt er[22]): „Du bist beinahe der Einzige, der meinen Angaben Glauben beimisst. Als ich den Professoren zu Florenz die vier Jupiter-Trabanten durch mein Fernrohr zeigen wollte, wollten sie weder diese noch das Fernrohr sehen, sie verschlossen ihre Augen vor dem Lichte der Wahrheit. Diese Gattung Menschen glaubt, in der Natur sei keine Wahrheit zu suchen, sondern nur in der Vergleichung der Texte. (Dies sind ihre eigenen Worte.)" Wenn wir Galilei nun als den ersten betrachten müssen, der nicht blindlings dem be-

---

[21]) Appendix statices, cap. II. Qu'on prenne deux balles de plomb (comme Jean Grotius et moi avons fait) l'une décuple à l'autre en grandeur et pesanteur, les laissans cheoir ensemble en mesme temps d'environ 30 pieds de haut sur une planche ou sur quelque autre chose où on puisse aisément entendre la cheute, là on pourra voir manifestement que le plus léger ne demeurera pas 10 fois plus longtemps au chemin que le plus pesant, mais qu'ils tomberont si également sur la planche, qu'il semble que ce ne soit qu'un seul coup.

[22]) Joh. Keppleri aliorumque epistolae mutuae, Lipsiae 1717, pag. 94, 95. Interea gratias ago, quod tu primus ac fere solus meis assertionibus integram fidem praebueris. Quid dices de primariis huj. Gymnasii Philosophis, qui nec Planetas nec Lunam nec perspicillum videre voluerunt? Verum ut ille aures, sic isti oculos contra veritatis lucem obturarunt. Putat enim hoc hominum genus, philosophiam esse librum quendam velut Aeneida et Odysseam; vera autem non in mundo, aut in natura, sed in confrontatione textuum (utor illorum verbis) esse quaerenda.

stehenden Autoritätsglauben sich überliess[23]), sondern unbefangenen Blickes und vorurtheilsfreien Geistes in das geheimnissvolle Leben und Treiben der Natur einzudringen versuchte, so müssen wir doch auch anerkennen, dass er das Studium der Schriften des Aristoteles, Archimedes, Plato, Euclid als eines der besten Mittel zur Erwerbung und Ausbildung eines ernsten wissenschaftlichen Sinnes nicht unterschätzte. Wir haben bereits an einem andern Orte angegeben, dass seine ersten Arbeiten über gewisse Probleme der Statik der fleissigen Beschäftigung mit den Werken der Alten ihren Ursprung verdankten und das zu vervollständigen und weiter zu entwickeln anstrebten, was noch unausgebildet ihm überliefert worden war. In der Bewegungslehre dagegen musste er ganz von vorn anfangen und das bis dahin aufgeführte Gebäude, welches wegen des morschen Grundes dem Einsturz nahe war, ganz niederreissen und den Bau auf neuen Fundamenten beginnen. In seinem unsterblichen Werke: „Discorsi e dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla Meccanica, ed ai movimenti locali, 1638", in das er seine tiefsinnigen Gedanken und geistreichen Untersuchungen niedergelegt hatte, wollte er, wie er es selbst im Anfange des III. Dialoges ausspricht[24]), über einen sehr alten Gegenstand eine ganz neue Wissenschaft begründen. Nichts sei älter in der Natur als die Bewegung, und es seien darüber umfangreiche Bände von den verschiedensten Philosophen zusammengeschrieben. Aber viele Erscheinungen, die des Wissens würdig, seien bis jetzt unbeobachtet oder unerklärt geblieben. Der Zugang zu dieser vorzüglichen Wissenschaft, von der seine Arbeiten die Elemente bilden sollen, sei jetzt erschlossen, und feinere Köpfe als der seinige würden in die geheimsten Gänge eindringen. Er griff zunächst den von Aristoteles angegebenen und von dessen Anhängern nachgebeteten Satz an, dass Körper von verschiedener Schwere in demselben Medium mit Geschwindigkeiten sich bewegen, die ihren Gewichten proportional sind, und zeigte durch mannigfache Experimente, wie dieser Satz, der sich beinahe zwei Jahrtausende unangefochten erhalten, mit der Erfahrung gänzlich im Widerspruch stehe. Es war seine Absicht, klar zu machen, wie die verschiedenen Geschwindigkeiten der Körper von verschiedenem Gewichte nicht in der verschiedenen Schwere derselben, sondern in äusseren Umständen und insbesondere in dem Widerstande des Mittels ihre Ursache haben, so dass nach Beseitigung derselben alle fallenden Körper mit denselben Geschwindigkeitsgraden sich bewegen würden[25]). Wäre die Ansicht des Aristo-

---

[23]) Opere di Galilei, vol. II, pag. 220. . . . nè altresi mi moverà l'autorità d'Aristotele, il quale in più d'un luogo afferma il contrario di questo, che l'esperienza mi mostra.

[24]) Opere di Galilei, vol. VIII, pag. 237. De subjecto vetustissimo novissimam promovemus scientiam. Motu nil forte antiquius in natura et circa eum volumina nec pauca nec parva a philosophis conscripta reperiuntur. Symptomatum tamen, quae complura et scitu digna insunt in eo, adhuc inobservata necdum demonstrata comperio.

Aditus et accessus ad amplissimam praestantissimamque scientiam, cujus hi nostri labores erunt elementa, recludetur, in qua ingenia meo perspicaciora abditiores recessus penetrabunt.

[25]) Opere di Galilei, vol. VIII, pag. 124. È l'intento mio dichiarare, come delle diverse velocità di mobili di differente gravità non ne sia altrimenti causa la diversa gravità, ma che ciò dipenda da accidenti esteriori ed in particolare dalla resistenza del mezzo, sicchè tolta questa tutti i mobili si moverebber con i medesimi gradi di velocità.

teles richtig und wählte man zwei Körper, deren natürliche Geschwindigkeiten ungleich wären, so müsste bei einer Verbindung beider zu einem Ganzen der schnellere von dem langsameren aufgehalten und der letztere von dem ersteren beschleunigt werden. Nehmen wir nun an, ein grosser Stein bewege sich mit einer natürlichen Bewegung von 8 Grad, und ein kleinerer mit 4 Grad Geschwindigkeit, so müssten beide, mit einander verbunden, mit einer Geschwindigkeit, die geringer als 8 Grad ist, herabfallen. Der aus beiden ungleichen Steinen zusammengesetzte Körper ist nun offenbar schwerer als der grössere von ihnen und soll sich langsamer bewegen als ein Theil desselben, und das steht mit dem angenommenen Satze im Widerspruch[26]).

Als Galilei endlich durch sorgfältig angestellte Versuche die Wahrnehmung machte, dass bei Kugeln aus Gold, Blei, Kupfer, Porphyr u. s. f. die Ungleichheit der Bewegung durch die Luft ganz unmerklich ist, so dass eine Kugel von Gold am Ende ihres Falles aus einer Höhe von 100 Ellen vor einer Kugel aus Kupfer kaum einen Vorsprung von 4 Zoll haben wird, und dass ferner dieser Unterschied abnimmt, wenn die Dichtigkeit des Mediums geringer wird, so kam er auf den Gedanken, wenn man den Widerstand gänzlich beseitigte, würden alle Materien mit gleichen Geschwindigkeiten fallen[27]). Diese Behauptung war so neu und beim ersten Anblick von der Wahrscheinlichkeit so entfernt, dass, wie Galilei sagt, es besser wäre sie zu verschweigen als offen auszusprechen, wenn man nicht die Macht hätte sie zu beweisen und klarer zu machen als die Sonne[28]). Wenn daher Sagredo darauf erwidert, dass nicht dieser Satz allein, sondern noch viele andere von seinen aufgestellten Behauptungen den hergebrachten Ansichten widersprechen, so dass, wenn sie ins Publikum drängen, sie eine grosse Anzahl von Widersachern heraufbeschwören würden[29]), so kann man ermessen, wie sehr jene Ansichten in Fleisch und Blut übergegangen waren. Hätte man dem Galilei Aristoteles lebend gegenüber stellen können, so hätte er hoffen dürfen durch die Kraft seiner Gründe den Peripatetiker zu überzeugen, während an den Schülern alle Mühe verschwendet war. „Denn so ist", sagt Kepler[30]), „der Lauf der Dinge. Aus Gyps kann man, wenn er eben frisch bereitet ist, alles Mögliche formen, verhärtet ist er aber in keine Form mehr zu bringen. Ebenso ist es mit den Meinungen und Ansichten. So lange sie aus dem Munde der Philosophen fliessen, können sie leicht

---

[26]) cf. Opere di Galilei, vol. VIII, pag. 107.

[27]) Ibid. pag. 121. Veduto che tra palle d'oro, di piombo, di rame, di porfido, o di altre materie gravi, quasi de tutto insensibile sarà la disegualità del moto per aria, che sicuramente una palla d'oro nel fine della scesa di cento braccia non preverrà una di rame di quattro dita: veduto, dico, questo, cascai in opinione, che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie discenderebbero con eguali velocità.

[28]) Ibid. pag. 139. . . . è tanto nuova e nella prima apprensione remota dal verisimile, che quando non si avesse modo di dilucidarla e renderla più chiara che 'l Sole, meglio sarabbe il tacerla che 'l pronunciarla.

[29]) Ibid. Non questa sola, ma molte altre insieme delle vostre proposizioni son così remote dalle opinioni e dottrine communemente ricevute, che spargendosi in publico vi conciterebbero numero grande di contraddittori.

[30]) cf. Jolly, Die Principien der Mechanik, 1852, pag. 68.

verbessert werden, sowie sie aber von den Schülern aufgenommen sind, verhärten sie ärger wie Stein und können durch keine Vernunftgründe mehr widerlegt werden.“ Galilei war von seiner Ansicht so vollständig überzeugt, dass er dreist behauptete[31]), keine Kugel sei so gross und von so fester Materie, dass der Widerstand des Mittels, möge er noch so gering sein, der Beschleunigung nicht Eintrag thäte. Wenn also nach Galilei die verschiedenen Arten des Widerstandes, die der Bewegung eines Körpers sich entgegensetzen, die Ursache der Verminderung seiner Geschwindigkeit sind, und andererseits der Grund seiner Beschleunigung in dem Streben des Körpers, sich dem Mittelpunkte unserer Erde zu nähern, zu suchen ist[32]), so folgt daraus unmittelbar, dass der Geschwindigkeitsgrad eines Körpers seiner Natur nach demselben unvertilgbar eingepflanzt ist und sich erhält, wenn auch die äusseren Ursachen der Beschleunigung oder der Verzögerung zu wirken aufgehört haben[33]). Dieser Fall tritt ein, wenn ein Körper auf horizontaler Unterlage sich befindet; er verhält sich dann der Bewegung und Ruhe gegenüber vollständig indifferent und hat nicht durch sich selbst die Neigung, sich nach irgend einer Seite hin zu bewegen[34]). Denn so wie es unmöglich ist, dass ein Körper sich von selbst nach oben hin bewegt, indem er sich von dem gemeinsamen Centrum, nach welchem alle Körper streben, entfernt, ebenso ist es undenkbar, dass er von freien Stücken eine Bewegung ausführt, wenn bei einer solchen Bewegung sein eigener Schwerpunkt sich nicht dem Erdmittelpunkte nähert[35]). Auf horizontaler Ebene ist deshalb die Bewegung, die dem Körper ursprünglich mitgetheilt worden ist, ewig und unveränderlich[36]).

Da nun andererseits der Widerstand, welchen das Medium der von den fallenden Körpern verursachten seitlichen Bewegung seiner Theile entgegensetzt, mit der Geschwindigkeit der Körper zu- oder abnimmt, so kann es sich ereignen, dass die Geschwindigkeit endlich auf den Punkt gelangt und der Widerstand des Mittels die Grösse erreicht, dass beide sich das Gleichgewicht halten und der Körper gezwungen ist in eine gleichförmige Bewegung überzugehen, die er dann fortwährend beibehält[37]).

---

[31]) Opere di Galilei, vol. VIII, pag. 154. . . . affermando senza veruna dubitazione, non essere sfera sì grande, nè di materia sì grave, che la renitenza del mezzo, ancorchè tenuissimo, non raffreni la sua accelerazione.

[32]) Ibid. pag. 125. Dico per tanto, che un corpo grave ha da natura intrinseco principio di muoversi verso il comun centro dei gravi, cioè del nostro globo terrestre.

[33]) Ibid. pag. 324. Attendere insuper licet, quod velocitatis gradus, quicunque in mobili reperiatur, est in illo suapte natura indelebiliter impressus, dum externae causae accelerationis aut retardationis tollantur, quod in solo horizontali plano contingit.

[34]) Ibid. pag. 279. . . . nella orizzontale, dove il mobile si trova indifferente al moto e alla quiete, e non ha per se stesso inclinazione di muoversi verso alcuna parte.

[35]) Ibid. pag. 279. . . . poichè siccome è impossibile, che un grave si muova naturalmente all'in su discostandosi dal comun centro, verso dove conspirano tutte le cose gravi, così è impossibile, che egli spontaneamente si muova, se con tal moto il suo proprio centro di gravità non acquista avvicinamento al suddetto centro comune.

[36]) Ibid. pag. 324. Ex quo sequitur, motum in horizontali esse quoque aeternum.

[37]) Ibid. pag. 126. . . . sicchè la velocità perviene a tal segno e la resistenza del mezzo a tal grandezza, che bilanciandosi fra loro levano il più accelerarsi, e riducono il mobile in un moto equabile ed uniforme, nel quale egli continua poi di mantenersi sempre.

Nachdem Galilei auf diese Weise der Materie gleichsam den Willen geraubt, den man ihr bisher zugeschrieben, und sich von der Eintheilung der Bewegung in eine natürliche und unnatürliche, in eine freie und gewaltsame, losgesagt hatte, konnte an eine wissenschaftliche Begründung der Bewegungserscheinungen gegangen werden.

Heut, nachdem mehr als zweihundert Jahre emsiger Arbeit seit Galilei verflossen sind, nachdem jener Galilei'sche Satz durch alle physikalischen Untersuchungen als richtig anerkannt und bestätigt worden ist, erscheint freilich die Aufstellung des Trägheitsprincipes als ein höchst einfacher und natürlicher Satz. Wenn man täglich die Wahrnehmung machte, dass die Körper in der einmal erzeugten Bewegung nicht mit gleichmässiger Geschwindigkeit verharren, sondern mit abnehmender Geschwindigkeit schliesslich in den Zustand der Ruhe oder in den des Gleichgewichts eintreten, so war es für alle diese Fälle der Bewegung nothwendig, sich den Begriff einer retardirenden Kraft klar zu machen und das Vorhandensein und den Einfluss einer solchen Kraft im Einzelnen nachzuweisen, um zu dem Schlusse zu gelangen, zu welchem Galilei in seinen Dialogen kam, dass die Bewegung eines auf einer horizontalen Ebene fortgeschleuderten Körpers, wenn jedes Hinderniss der Bewegung ausgeschlossen würde, gleichförmig und immerdauernd sein würde[38]). Es darf uns daher auch nicht Wunder nehmen, wenn Descartes von dem nur auf Erfahrung beruhenden Gesetze der Trägheit, das er in seinen „Principien der Philosophie, 1644" gut und rein darstellt, eine Beweisführung a priori versucht. „Das erste der Naturgesetze", heisst es im § 37, „ist, dass jede Sache als einfache und ganze, so viel von ihr abhängt, in demselben Zustande verharrt und ihn nur in Folge äusserer Ursachen verändert. Ist daher ein Theil des Stoffes viereckig, so sehen wir leicht ein, dass er immer viereckig bleiben wird, so lange nicht von aussen etwas kommt, was seine Gestalt verändert. Ruht er, so sind wir überzeugt, dass er sich nicht zu bewegen anfangen wird, wenn nicht eine Ursache ihn dazu anstösst. Und derselbe Grund ist es, wesshalb wir annehmen, dass eine bewegte Sache niemals von selbst und ohne von einer anderen gehemmt zu werden ihre Bewegung aussetzen werde. Daraus folgt, dass das Bewegte, so viel von ihm abhängt, sich immer bewegen wird. Allein da wir hier auf der Erde uns befinden, die so eingerichtet ist, dass alle Bewegungen in ihrer Nähe bald erlöschen, und zwar oft aus Ursachen, die sich unserer Wahrnehmung entziehen, so haben wir seit unserer Kindheit angenommen, dass solche Bewegungen, die aus unbekannten Ursachen gehemmt werden, von selbst aufgehört haben, und sind desshalb geneigt, das bei Vielem Bemerkte von Allem anzunehmen, nämlich, dass alle Bewegung von Natur aufhöre oder nach der Ruhe strebe[39])."

---

[38]) Opere di Galilei, vol. IX, pag. 5. Mobile quoddam super planum horizontale projectum mente concipio omni secluso impedimento; jam constat ex his, quae fusius alibi dicta sunt, illius motum aequabilem et perpetuum super ipso plano futurum esse, si planum in infinitum extendatur.

[39]) Principia philosophiae, § 37. Harum (scil. legum naturae) prima est, unamquamque rem, quatenus est simplex et indivisa, manere, quantum in se est, in eodem semper statu nec unquam mutari, nisi a causis externis. Ita si pars aliqua materiae quiescat, non credimus illam unquam incepturam moveri, nisi ab aliqua causa ad id impellatur; nec ulla major ratio est, si moveatur, cur putemus ipsam unquam sua sponte et a nullo alio impeditam motum illum suum esse intermissuram. Atque ideo concludendum est, id quod mo-

Wenn Descartes nun zur Begründung des Vorangehenden fortfährt: „Dies ist indess den Naturgesetzen geradezu zuwider; denn die Ruhe ist der Gegensatz der Bewegung, und sie kann aus ihrer Natur nichts zu ihrem Gegentheil oder zur Zerstörung ihrer selbst beitragen[40])“, — so erinnert diese Art der Beweisführung allzusehr an die Scholastik. Auch der Grund, den er für sein zweites Gesetz anführt, dass jeder Theil der Materie, für sich betrachtet, nur in gerader Richtung, aber nie in gekrümmter seine Bewegung fortzusetzen strebt, ist derselbe wie bei dem ersten, nämlich „die Unveränderlichkeit und Einfachheit der Wirksamkeit, mit der Gott die Bewegung in dem Stoffe erhält. Denn er erhält sie genau so, wie sie in dem Augenblicke ist, wo er sie zu erhalten beginnt, ohne sich darum zu kümmern, was sie vor diesem Augenblick gewesen sein mag[41]).“ Wir wollen mit Whewell die Zuflucht zu solchen Beweisgründen als einen Hinweis auf jene Nothwendigkeit und absolute Allgemeinheit gelten lassen, die wir in vollendeten Wissenschaften zu erstreben suchen.

§ 2. Princip gleichförmig beschleunigter Bewegung.

Indem Galilei das Trägheitsprincip, das Redtenbacher in seinen „Principien der Mechanik“ mit dem nicht unpassenden Namen: „Princip der Selbsterhaltung“ bezeichnet, klar und richtig aussprach und dadurch zuerst das Bewegliche oder Bewegte von dem, was Bewegung erzeugt, streng unterschied, brach er vollständig mit den bis dahin herrschenden Ansichten. War man früher der Meinung, durch eine bewegende Kraft würde etwas in den Körpern erregt, wodurch sie so lange sich bewegten, bis dieses angeregte Etwas erschöpft wäre, so befestigte sich mit und nach Galilei immer mehr der richtige Gedanke, dass für jede Aenderung in dem Zustande der Körper auch ein äusserer Grund dieser Veränderung, die Thätigkeit einer Kraft, erforderlich sei. Wenn wir daher die tägliche Beobachtung machen, dass ein Körper, wenn er seiner stützenden Unterlage beraubt wird, mit wachsender Geschwindigkeit zur Erde fällt, so müssen wir diese Aenderung in der Bewegung der Wirkung einer beschleunigenden Kraft zuschreiben, die den Geschwindigkeitszustand des bewegten Körpers in jedem Augenblicke ändert. Galilei stellte sich nun keineswegs die Aufgabe, die Ursache dieser

---

vetur quantum in se est semper moveri. Sed quia hic versamur circa terram, cujus constitutio talis est, ut motus omnes qui prope illam fiunt brevi sistantur et saepe ob causas, quae sensus nostros latent, ideo ab ineunte aetate saepe judicavimus, eos motus qui sic a causis nobis ignotis sistebantur sua sponte desinere. Jamque proclives sumus ad illud de omnibus existimandum, quod videmur in multis esse experti, nempe illos ex natura sua cessare sive tendere ad quietem.

[40]) Ibid. Quod profecto legibus naturae quam maxime adversatur, quies enim motui contraria, nihilque ad suum contrarium sive ad destructionem sui ipsius ex propria natura ferri potest.

[41]) Ibid. § 39. Altera lex naturae est: unamquamque partem materiae seorsim spectatam non tendere unquam ut secundum ullas lineas obliquas pergat moveri, sed tantum modo secundum rectas. Causa hujus regulae eadem est quae praecedentis, nempe immutabilitas et simplicitas operationis, per quam Deus motum in materia conservat. Neque enim illum conservat nisi praecise qualis est eo ipso temporis momento quo conservat, nulla habita ratione ejus qui forte fuit paulo ante.

constant wirkenden Kraft aufzusuchen und etwas Handgreifliches und in der Natur Sichtbares anzugeben, worin sie ihren Sitz habe; er begnügte sich damit, die Gesetze der Geschwindigkeit freifallender Körper als eine blosse Regel für die Erscheinungen zu betrachten. „Ich halte es", heisst es im dritten Dialoge, „nicht für angezeigt, jetzt in eine Untersuchung über die Ursache der Beschleunigung bei natürlichen Bewegungen einzugehen. Die Meinungen der Philosophen sind darüber sehr verschieden. Einige beziehen diese Zunahme der Geschwindigkeit auf die Annäherung der Körper an den Mittelpunkt der Erde, andere auf ein gewisses Vorwärtsstossen des den Körper umgebenden Mediums, das sich hinter dem Körper wieder vereinigt und denselben ununterbrochen drängt und treibt. Für uns genügt es gegenwärtig, die Eigenschaften dieser Bewegung unter der Voraussetzung jenes einfachen Gesetzes kennen zu lernen, dass in gleichen Zeiten die Geschwindigkeiten um dieselbe Grösse zunehmen[42]."

Galilei begann nun seine Untersuchung über die beschleunigte Bewegung mit der Aufstellung einer Definition derselben, die sich mit der in der Natur beim Fallen der Körper zur Anwendung kommenden in Uebereinstimmung befindet. Er wurde hierbei, nach seinem eigenen Geständniss[43]), geleitet durch die Beobachtung der Gewohnheit und Einrichtung der Natur in allen ihren Werken, immer die ersten, einfachsten und leichtesten Mittel anzuwenden. „Das Schwimmen oder Fliegen", sagt er, „kann wohl auf keine einfachere Art ausgeführt werden, als wie es bei den Fischen und Vögeln in Folge des Instinktes geschieht. Wenn ich also die Wahrnehmung mache, dass ein Stein, der aus dem Zustand der Ruhe zur Erde fällt, immer neue auf einander folgende Vermehrungen an Geschwindigkeit erlangt, warum soll ich nicht annehmen, dass dieser Zuwachs auf die einfachste und allgemein verständlichste Art erfolgt? Ja, wenn wir aufmerksam untersuchen, werden wir finden, dass der einfachste Zuwachs an Geschwindigkeit derjenige ist, der immer auf dieselbe Weise erfolgt; es ist dies leicht einzusehen, wenn wir den innigen Zusammenhang zwischen Zeit und Bewegung in Betracht ziehen."

---

[42]) Opere di Galilei, vol. VIII, pag. 256. Non mi par tempo opportuno di entrare al presente nell' investigazione della causa dell' accelerazione del moto naturale, intorno alla quale da varj Filosofi varie sentenze sono state prodotte: riducendola alcuni all' avvicinamento al centro, altri a certa estrusione del mezzo ambiente, il quale nel ricongiugnersi a tergo del mobile lo va premendo e continuatamente scacciando. Per ora basta al nostro Autore, che noi intendiamo, che egli ci vuole investigare e dimostrare alcune passioni di un moto accelerato, talmente che i momenti della sua velocità vadano accrescendosi dopo la sua partita dalla quiete con quella simplicissima proporzione, colla quale cresce la continuazione del tempo, che è quanto dire, che in tempi eguali si facciano eguali additamenti di velocità.

[43]) Ibid. pag. 247. Postremo ad investigationem motus naturaliter accelerati nos quasi manu duxit animadversio consuetudinis atque instituti ipsiusmet naturae in ceteris suis operibus omnibus, in quibus exserendis uti consuevit mediis primis, simplicissimis, facillimis. Neminem enim esse arbitror qui credat, natatum aut volatum simpliciori aut faciliori modo exerceri posse quam eo ipso, quo pisces et aves instinctu naturali utuntur. Dum igitur lapidem ex sublimi a quiete descendentem nova deinceps velocitatis acquirere incrementa animadverto, cur talia additamenta simplicissima atque omnibus magis obvia ratione fieri non credam? Quod si attente inspiciamus, nullum additamentum, nullum incrementum magis simplex inveniemus, quam illud, quod semper eodem modo superaddit. Quod facile intelligemus maximam temporis atque motus affinitatem inspicientes.

Sowie also Galilei unter einer gleichförmigen Bewegung diejenige verstand, deren von dem Körper in allen gleichen Zeiten zurückgelegte Wegabschnitte unter einander gleich sind[44]), so bestimmte er die gleichförmig beschleunigte Bewegung als eine solche, die von der Ruhe ausgehend in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeits-Vermehrungen erhält[45]). Der eigentliche Grund, auf welchem Galilei die Feststellung des Begriffs einer gleichförmig beschleunigten Bewegung beruhen liess, nämlich die vorausgesetzte Einfachheit der Natur, mag etwas unsicher und gewagt erscheinen, denn es dürfte nicht schwer fallen, noch andere Gesetze für den freien Fall der Körper anzugeben, die ebenfalls den Stempel der Einfachheit an sich tragen und doch nicht mit der Erfahrung in Uebereinstimmung gebracht werden können. Wurde doch Galilei selbst durch dieses Streben nach Einfachheit anfangs zu einer ganz falschen Hypothese verführt, die einen mathematischen Widerspruch in sich enthielt und jede Bewegung in der Natur unmöglich machen würde. In einem Padua den 16. October 1604 datirten Briefe stellte er als Axiom den Satz auf, dass die Geschwindigkeit, die ein Körper in jedem Punkte seiner senkrechten Bahn hat, dem vom Anfange seiner Bewegung durchmessenen Raum proportional sei[46]). Fällt z. B. ein Körper durch den Weg ABCD, so soll sich die Geschwindigkeit des Körpers in B zu der in C verhalten, wie AB : AC. Wäre dies richtig, so müsste der Körper die Strecken AB und AC in derselben Zeit zurücklegen.

Einige Zeit blieb Galilei in diesem Irrthum befangen[47]), und wir haben nicht finden können, wann er zu der richtigen Auffassung geführt wurde.

Indem er nun von dem oben angegebenen Begriff einer gleichförmig beschleunigten Bewegung ausging, fand er folgende bemerkenswerthe Eigenschaften derselben auf:

I. Die Zeit, in der ein Körper vom Zustande der Ruhe aus irgend eine Weglänge mit gleichmässig wachsender Geschwindigkeit zurücklegt, ist der Zeit gleich, in welcher derselbe Weg von demselben Körper in gleichförmiger Bewegung mit einer Geschwindigkeit durchmessen wird, welche die Hälfte von der Endgeschwindigkeit der ersteren Bewegung ist[48]).

Beweis: AB (Fig. II.) bedeute die Zeit, in welcher die Strecke CD in gleichförmig beschleunigter Bewegung durchmessen wird. Stellt nun die Senkrechte BE die Endgeschwindigkeit dar, so werden die zu BE durch die unzähligen Punkte von AB bis zu der

---

[44]) Ibid. pag. 238. Aequalem seu uniformem motum intelligo eum, cujus partes quibuscunque temporibus aequalibus a mobili peractae sunt inter se aequales.

[45]) Ibid. pag. 249. Motum aequabiliter seu uniformiter acceleratum dico illum, qui a quiete recedens temporibus aequalibus aequalia celeritatis momenta sibi superaddit.

[46]) Opere di Galilei, vol. X, pag. 87. Mi mancava principio totalmente indubitabile da poter porlo per assioma. Ed il principio è questo, che il mobile naturale vada crescendo di velocità con quella proprzione che si discosta dal principio del suo moto.

[47]) Ibid. vol. VIII, pag. 258. . . . il nostro medesimo Autore non mi negò, d'esser egli ancora stato per qualche tempo nella medesima fallacia.

[48]) Ibid. vol. VIII, pag. 266. Tempus, in quo aliquod spatium a mobili conficitur latione ex quiete uniformiter accelerata, est aequale tempori, in quo idem spatium conficeretur ab eodem mobili motu aequabili delato, cujus velocitatis gradus subduplus sit ad summum et ultimum gradum velocitatis prioris motus uniformiter accelerati.

Verbindungslinie AE gezogenen Parallelen die jenen Punkten entsprechenden Geschwindigkeiten repräsentiren. Ist F die Mitte von BE und GF der Linie AB parallel gezogen, so ist $\triangle$ AEB = # ABFG. Werden nun die Parallelen des Dreiecks ABE bis GF verlängert, so ist das Aggregat aller im Parallelogramm ABFG enthaltenen Parallelen gleich der Summe der in dem Dreieck AEB gezogenen Parallelen. Da nun jeder Parallelen ein Geschwindigkeitsgrad entspricht, so ist einleuchtend, dass bei der nach den zunehmenden Parallelen des $\triangle$ AEB beschleunigten Bewegung genau eben so viel Geschwindigkeits-Momente, so zu sagen, verbraucht sind, als bei der durch die Parallelen des # ABFG repräsentirten gleichförmigen Bewegung. Bewegt sich daher ein Körper die Zeit AB hindurch mit gleichförmig beschleunigter Bewegung, deren Endgeschwindigkeit BE ist, und ein zweiter Körper dieselbe Zeit AB hindurch mit der gleichmässigen Geschwindigkeit $BF = \frac{BE}{2}$, so werden die zurückgelegten Strecken einander gleich sein.

II. Wenn ein Körper mit gleichförmig beschleunigter Bewegung aus dem Zustande der Ruhe senkrecht herabfällt, so verhalten sich die in beliebigen Zeiten zurückgelegten Wegabschnitte wie die Quadrate der Zeiten[49]).

Beweis: AB (Fig. III.) repräsentire wiederum die vom ersten Augenblicke A an verflossene Zeit, AD und AE seien zwei beliebige Zeiten, HL und HM mögen die in den Zeiten AD und AE zurückgelegten Räume darstellen. Wenn nun ferner DO und EP die Endgeschwindigkeiten bedeuten sollen, die der Körper in L und M erlangt hat, so würde nach dem vorigen Satze der Körper, wenn er sich gleichmässig bewegt hätte, dieselbe Strecke HL mit einer Geschwindigkeit $= \frac{DO}{2}$ und HM mit einer Geschwindigkeit $= \frac{EP}{2}$ durchmessen haben. Der mit gleichförmiger Geschwindigkeit zurückgelegte Raum ist aber gleich dem Produkt aus Zeit und Geschwindigkeit.

$$\text{Mithin verhält sich } \frac{HM}{HL} = \frac{AE \,.\, \frac{EP}{2}}{AD \,.\, \frac{DO}{2}} = \frac{AE \,.\, EP}{AD \,.\, DO}.$$

Da nun die Geschwindigkeiten den Zeiten proportional sind, so verhält sich $\frac{EP}{DO} = \frac{AE}{AD}$.

$$\text{Folglich } \frac{HM}{HL} = \frac{\overline{AE}^2}{\overline{AD}^2} \text{ oder auch } = \frac{\overline{EP}^2}{\overline{DO}^2}.$$

Coroll. 1. Denkt man sich die vom Anfange der Bewegung aus verflossene Zeit in gleiche Intervalle getheilt, so verhalten sich die auf einander folgenden Räume, die in

---

[49]) Ibid. pag. 268. Si aliquod mobile motu uniformiter accelerato descendat ex quiete, spatia quibuscunque temporibus ab ipso peracta sunt inter se in duplicata ratione eorundem temporum: nempe ut eorundem temporum quadrata.

den ihnen entsprechenden Zeittheilchen zurückgelegt werden, wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, . . .[50])

Coroll. 2. Wählt man vom Anfange der Bewegung aus gerechnet zwei beliebige Fallräume, so verhalten sich die Fallzeiten zu einander, wie der eine der Fallräume zur mittleren Proportionale zwischen beiden[51]).

Beweis: Ein Körper lege in der Zeit t den Raum ST und in der Zeit t_1 den Raum SV zurück, so verhält sich $\frac{SV}{ST} = \frac{t_1^2}{t^2} = \frac{\overline{SV}^2}{ST \,.\, SV}$.

Ist nun SX die mittlere Proportionale zwischen ST und SV, so ist $\overline{SX}^2 = ST \,.\, SV$, mithin $\frac{t_1^2}{t^2} = \frac{\overline{SV}^2}{\overline{SX}^2}$ d. h. $\frac{t_1}{t} = \frac{SV}{\overline{SX}}$.

Nachdem Galilei bewiesen, dass bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung, bei welcher die erlangten Geschwindigkeiten den Zeiten proportional sind, die zurückgelegten Räume sich wie die Quadrate der Zeiten verhalten, stellte er zahlreiche Versuche über den Fall der Körper auf verschieden geneigten Ebenen an. „Und wenn es sich hierbei ereignet", heisst es in seinen Dialogen[52]), „dass jene oben bewiesenen Eigenschaften bei der Bewegung freifallender Körper sich bewähren, so können wir daraus den Schluss ziehen, dass unsere angenommene Definition auch diese Bewegung der Körper in sich schliesst, und dass in Wahrheit die Beschleunigung der Zeit proportional zunimmt."

Galilei setzte bei seinen experimentellen Untersuchungen folgendes zuerst als Axiom hingestellte Princip voraus:

„Wenn derselbe Körper in verschieden geneigten Ebenen von derselben Höhe herabfällt, so ist seine am Ende des Falls erlangte Geschwindigkeit immer dieselbe[53])."

---

[50]) Ibid. pag. 270. Hinc manifestum est, quod si fuerint quotcunque tempora aequalia consequenter sumta a primo instanti seu principio lationis, ut puta AD, DE, EF, FG, quibus conficiantur spatia HL, LM, MN, . . . ipsa spatia erunt inter se, ut numeri impares ab unitate, scilicet ut 1, 3, 5, 7.

[51]) Ibid. pag. 276. Colligitur secundo, quod si a principio lationis sumantur duo spatia quaelibet quibuslibet temporibus peracta, tempora ipsorum erunt inter se, ut alterum eorum ad spatium medium proportionale inter ipsa.

[52]) Ibid. pag. 257. E se s'incontrerà, che gli accidenti, che poi saranno dimostrati, si verifichino nel moto dei gravi naturalmente discendenti ed accelerati, potremo reputare, che l'assunta definizione comprenda cotal moto dei gravi, e che vero sia, che l'accelerazione loro vada crescendo secondo che cresce il tempo.

[53]) Ibid. pag. 261. Accipio, gradus velocitatis ejusdem mobilis super diversas planorum inclinationes acquisitos tunc esse aequales, cum eorundem planorum elevationes aequales sint.

Die Richtigkeit dieses Princips suchte er durch einen sehr sinnreichen Versuch an einem Pendel zu beweisen. Wenn eine in A (Fig. IV.) an einen Faden AC befestigte Kugel den Bogen CB beschrieben hat, so legt sie in Folge der in B erlangten Geschwindigkeit einen dem Bogen CB gleichen Bogen BD zurück. Wird nun in E oder F in die dahinter befindliche Wand ein Nagel eingeschlagen, der 5 bis 6 Zoll vorsteht, und wird die Kugel ebenfalls in die Lage von AC gebracht und darauf losgelassen, so beschreibt sie zunächst wiederum den Bogen CB. In die Lage AB gekommen stösst der Faden auf den Nagel E oder F, und die Kugel ist gezwungen von jetzt an einen kleineren Bogen um E oder F zu beschreiben. Dieselbe Kraft, die im ersteren Falle die Kugel den Bogen BD hinaufsteigen liess, treibt dieselbe, wie der Augenschein lehrt, im letzteren Falle auf dieselbe Höhe durch den Bogen BG oder BJ. Da nun die beiden Bogen BD und BC einander gleich sind, so erlangt die Kugel in B dasselbe Moment, mag sie nun durch CB oder DB gefallen sein. Mithin ist das durch DB erlangte Moment so gross, dass es denselben Körper durch denselben Raum BD wieder aufsteigen lässt. Nun sind alle Momente, welche die Kugel die Bogen BD, BG, BJ zurückzulegen zwingen, einander gleich, nämlich jedes gleich dem durch den Weg CB erlangten Momente; folglich sind auch die durch den Fall auf den Bogen DB, GB, JB erzeugten Momente einander gleich.

Der von Galilei für jenes Postulat nachträglich gelieferte strengere Beweis gründet sich auf das Gesetz, dass das Streben eines Körpers auf einer schiefen Ebene herabzugleiten nur ein aliquoter Theil ist von der Neigung desselben Körpers senkrecht zu fallen. Es verhält sich nämlich der impetus eines Körpers durch AC (Fig. V.) zu fallen zu demjenigen desselben Körpers auf der schiefen Ebene AB herabzugleiten wie AB : AC. Macht man AD gleich der dritten Proportionale zwischen AB und AC, so dass $\frac{AB}{AC} = \frac{AC}{AD}$ ist, so verhält sich $\frac{\text{impetus eines Körpers durch AC zu fallen}}{\text{impetus desselben Körpers durch AB oder AD zu fallen}} = \frac{AC}{AD}$ d. h. der Körper wird in derselben Zeit die Strecke AC und AD zurücklegen.

Es verhält sich nun ferner

$$\frac{\text{Geschwindigkeitsgrad des Körpers in C}}{\text{Geschwindigkeitsgrad in D}} = \frac{AC}{AD}$$

und ausserdem nach der zu Grunde gelegten Definition einer gleichförmig beschleunigten Bewegung $\frac{\text{Geschwindigkeitsgrad in B}}{\text{Geschwindigkeitsgrad in D}} = \frac{\text{Fallzeit durch AB}}{\text{Fallzeit durch AD}}$.

Nach Coroll. 2 d. Prop. 2 ist aber $\frac{\text{Fallzeit durch AB}}{\text{Fallzeit durch AD}} = \frac{AC}{AD}$.

Die in B und C erlangten Geschwindigkeitsgrade stehen also zu demjenigen in D in demselben Verhältniss, sind also einander gleich.

Hieraus folgt unmittelbar nachstehender Satz, der von grosser Wichtigkeit ist:

„Wenn von dem höchsten oder niedrigsten Punkte eines auf der Horizontalebene senkrecht stehenden Kreises bis zur Peripherie geneigte

Ebenen gelegt werden, so sind die Fallzeiten durch dieselben einander gleich[54]).“

Galilei liess nun auf einer mit geglättetem Pergament ausgelegten Fallrinne von 12 Ellen Länge und 1 Zoll Breite eine Metallkugel herabgleiten und bestimmte durch vielfach angestellte Versuche ganz genau die Fallzeit derselben, indem er die Quantität Wasser abwog, die während dieser Zeit durch ein dünnes Röhrchen aus einem Wasserbehältniss abfloss. Legte die Kugel nur den vierten Theil des ganzen Raumes zurück, so betrug die dazu gehörige Fallzeit die Hälfte. Wählte er andere Verhältnisse der Weglängen oder anders geneigte Ebenen, so erhielt er andere Fallzeiten, sie verhielten sich aber stets wie die Quadratwurzeln aus den Längen. Er zog daraus den Schluss, dass die Bewegung auf schiefen Ebenen eine gleichförmig beschleunigte sei; und da nach obigem Postulat der Geschwindigkeitsgrad eines auf schiefer Ebene herabgleitenden Körpers in jedem Punkte seiner Bahn gleich ist der durch den senkrechten Fall in dem Punkte von gleicher Höhe erlangten Geschwindigkeit, so folgt, dass auch die Bewegung eines freifallenden Körpers eine gleichförmig beschleunigte ist.

In Folge des Trägheitsprincipes kann eine Geschwindigkeitsänderung nur durch die Wirksamkeit einer Kraft erfolgen, und da in jeder beschleunigten Bewegung die Geschwindigkeitsänderungen stetig auf einander folgen, so kann auch eine Bewegung mit beschleunigter Geschwindigkeit nur durch eine stetig wirkende Kraft erzeugt werden. Der von Galilei nur stillschweigend angenommene, nicht direkt ausgesprochene Begriff der Schwerkraft als einer die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers constant und gleichförmig vermehrenden Kraft, so klar er uns jetzt erscheint, muss doch damals, als er sich zuerst dem Verstande aufdrängte, einige Schwierigkeiten dargeboten haben. Descartes, der im Allgemeinen findet, dass Galilei zwar weit besser philosophire, als der gewöhnliche Schlag von Gelehrten, doch aber ohne Fundament gebaut zu haben scheine[55]), hatte offenbar jenen Begriff der Schwerkraft nicht richtig aufgefasst. So sagt er in einem Briefe an Mersenne: „Ich wundere mich sehr über den Satz, den Sie durch Ihre Versuche gefunden haben wollen, dass senkrecht aufwärts geworfene Körper dieselbe Zeit brauchen aufwärts zu steigen, als dazu, durch denselben Raum abwärts zu fallen, und Sie werden mich entschuldigen, wenn ich behaupte, dass ein Experiment dieser Art sehr schwer mit Genauigkeit anzustellen ist[56]).“

Und doch muss der steigende und der fallende Körper, abgesehen von dem Widerstande der Luft, in derselben Zeit immer denselben Raum zurücklegen; denn dieselbe

---

[54]) Ibid. pag. 290. Si a puncto sublimi vel imo circuli ad horizontem erecti ducantur quaelibet plana usque ad circumferentiam inclinata, tempora descensuum per ipsa erunt aequalia.

[55]) Oeuvres de Descartes, publ. par Cousin, Paris 1824, vol. VII, pag. 343. Je trouve en général qu'il (Galilée) philosophe beaucoup mieux que le vulgaire. Mais il me semble qu'il a bâti sans fondement et entièrement en l'air. (Der Brief, dem diese Stelle entnommen, ist im Jahre 1638 geschrieben.)

[56]) Ibid. vol. IX, pag. 348. Je m'étonne de ce que vous dites avoir expérimenté, que les corps qu'on jette en l'air n'emploient ni plus ni moins de temps à monter qu'à descendre, et vous m'excusez bien, si je vous dis que je juge, qu'il a été très-malaisé d'en faire exactement l'expérience.

Kraft, die in einer gewissen Zeit die Anfangsgeschwindigkeit des aufsteigenden Körpers gänzlich vernichten soll, muss in derselben Zeit bei dem fallenden Körper auch wieder dieselbe Geschwindigkeit, nur in umgekehrter Reihenfolge, erzeugen.

Anmerkung. Während in dem pag. 14 angezogenen Briefe vom 16. October 1604 Galilei noch die Geschwindigkeit dem Raume proportional wachsen lässt, hat er in einem an Guido Ubaldi im Jahre 1602 (29. November) gerichteten Briefe (cf. Opere di Galilei, vol. X, pag. 103) bereits den Satz ausgesprochen, dass ein Körper, der die nach dem tiefsten Punkte eines senkrecht stehenden Kreises gezogenen Sehnen durchläuft, dieselben in gleichen Zeiten zurücklegt. Offenbar liegt hier ein Irrthum in der Angabe der Jahreszahlen jener beiden Briefe vor, denn dem letzten Satze liegt das richtige Gesetz der Beschleunigung zu Grunde.

§ 3. Princip der relativen Bewegung.

Die heliocentrische Theorie des Kopernicus (1472—1543), welche den Mittelpunkt aller planetarischen Bewegungen in die Sonne verlegte und durch die Beseitigung des Gerüstes von Epicykeln und excentrischen Kreisen, dessen sich die geocentrische Hypothese bedienen musste, die ganze Theorie der Planeten viel einfacher und symmetrischer darstellte, fand anfangs, wie zu erwarten stand, nur sehr geringe Verbreitung und Anerkennung. Man warf dem neuen System besonders vor, es beantworte die Frage ungenügend, woher es komme, dass ein Stein, der von der Spitze eines Thurmes herabgelassen wird, an dem Fusse desselben zur Erde falle. Wenn sich während des Falles die Erde und mit ihr der Thurm von Westen nach Osten bewegte, so müsste ja der Stein auf der Westseite des Thurmes zurückbleiben. Kopernicus suchte diesen Einwand auf folgende Weise zu widerlegen: „Bei fallenden und aufsteigenden Körpern ist die Bewegung aus der geradlinigen und der Kreisbewegung zusammengesetzt. Denn die Körper, die durch ihr eigenes Gewicht zur Erde fallen, behalten ohne Zweifel als Theile der Erde denselben natürlichen Zustand bei wie ihr Ganzes. Da nun die allen Körpern gemeinsame Bewegung die Kreisbewegung ist, die als ein Zustand der Ruhe erscheint, so können wir behaupten, dass die Kreisbewegung mit der geradlinigen vereinigt bleibt, wie z. B. die thierische Seele mit dem Pferde[57]."

Wenn sich nun auch bei Kopernicus noch ein Befangensein in den althergebrachten Aristotelischen Begriffen nicht verkennen lässt, so dürfte doch die Vermuthung nahe liegen, dass ihm bereits eine dunkle und noch unentwickelte Idee von der Zusammensetzung der Bewegungen vorgeschwebt habe. Da man jedoch nur zu sehr

---

[57]) De Revolutionibus orbium coelestium, 1854, lib. I, cap. VIII, pag. 29. Cadentium vero et ascendentium duplicem esse motum fateamur oportet et omnino compositum ex recto et circulari. Quandoquidem quae pondere suo deprimuntur, cum sint maxime terrea, non dubium, quin eandem servent partes naturam, quam suum totum. Cum ergo motus circularis sit universorum, partium vero etiam rectus, dicere possumus, manere cum recto circularem, sicut cum equo animal.

geneigt ist, aus den Schriften eines mit so hervorragendem Geiste ausgestatteten Mannes, wie Kopernicus es war, so viel als möglich herauszulesen, so wollen auch wir diese Ansicht nur als eine Vermuthung ausgesprochen wissen.

Mit unzweifelhafterem Rechte kann man behaupten, dass Galilei jenes aus der Erfahrung entnommene Princip zuerst aufgestellt habe, das sich in folgender Weise ausdrücken lässt: Wenn ein Körper eine Bewegung besitzt und einer der Punkte dieses Körpers, der also die Bewegung des Körpers schon hat, durch irgend eine Kraft nach irgend einer Richtung bewegt wird, so ist die Bewegung dieses Punktes in Bezug auf den bewegten Körper, das ist eben seine relative Bewegung, dieselbe, als wenn das System in Ruhe wäre. Galilei hatte dieses Princip der relativen Bewegung, das von Newton als Basis des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte betrachtet worden ist, noch nicht in dieser allgemeinen Form angegeben; nach ihm wird in allen Fällen die Bewegung, die aus der Wirkung einer Kraft entsteht, mit derjenigen verbunden, die der Körper schon früher hatte.

Indem er nun dieses Princip zur Bestimmung der Bahn geworfener Körper anwendete, führte er eine der alltäglichsten Erscheinungen auf ihre Ursachen zurück. Der hierauf bezügliche Satz lautet:

„Bewegt sich ein geworfener Körper mit einer Bewegung, die aus einer horizontalen gleichförmigen und einer verticalen natürlich beschleunigten zusammengesetzt ist, so beschreibt derselbe den Bogen eines halben Parabelzweiges[58]).“

Beweis: Wird ein Körper von einer Höhe aus in horizontaler Richtung fortgeschleudert, so würde er, wenn die Schwere nicht auf ihn wirkte, in horizontaler Richtung mit der gleichförmigen Geschwindigkeit sich fortbewegen, die ihm die horizontal wirkende Kraft ertheilte. Es sollen nun bc (Fig. VI.), cd, de u. s. f. gleiche Zeittheilchen bedeuten, in denen der Körper mit der gleichförmigen Geschwindigkeit, die durch dieselben Strecken bc, cd, ef u. s. f. ausgedrückt seien, sich horizontal bewegen würde. Da aber vom ersten Augenblicke an, in welchem der Körper die Hand verlässt, die Schwere zu wirken beginnt, so möge die vertical abwärts gerichtete Bewegung desselben in der Zeit bc einem Stücke bo = ci gleich sein. Der Körper wird sich also am Ende des Zeittheilchens bc nach dem Princip der relativen Bewegung in i befinden; nach der doppelten Zeit bd wird der Fallraum schon 4mal grösser sein, also = 4 . bo = bg = df; nach drei Zeittheilchen ist der Fallraum 9mal grösser als in dem ersten Zeittheilchen, mithin = 9 bo = bl = eh u. s. f.

Es verhält sich also:

$$\frac{\overline{hl}^2}{\overline{fg}^2} = \frac{bl}{bg}, \text{ und } \frac{\overline{fg}^2}{\overline{io}^2} = \frac{bg}{bo}$$

d. h. die Punkte i, f, h liegen in einer Parabel.

---

[58]) Opere di Galilei, vol. IX, pag. 7. Projectum dum fertur motu composito ex horizontali aequabili et ex naturaliter accelerato deorsum, lineam semiparabolicam describit in sua latione.

Simplicius, einer der drei von Galilei in den Dialogen redend Eingeführten, erinnert daran, dass die angegebene Theorie mit der Erfahrung niemals übereinstimmen werde, da der Widerstand des Mittels nicht ohne Einfluss sei und die Horizontalebene streng genommen nicht in allen ihren Theilen vom Mittelpunkt der Erde gleiche Entfernung habe[59]).

Galilei muss dies zugestehen, allein er sagt: „Um einen derartigen Gegenstand wissenschaftlich behandeln zu können, muss man davon abstrahiren und sich bei der praktischen Anwendung der Schlussfolgerungen, die man ohne Rücksicht auf die Hindernisse gefunden und bewiesen hat, mit denjenigen Einschränkungen bedienen, die uns die Erfahrung vorschreiben wird[60])."

Der engere und weitere Kreis der Schüler und Anhänger Galilei's verbreitete rasch die neuen Lehren; sie stellten sich zunächst die Aufgabe, die Untersuchungen ihres Lehrers, die sich auf die Entwicklung der Gesetze freifallender, horizontal geworfener und auf schiefen Ebenen herabgleitender Körper beschränkten, durch zahlreich angestellte Versuche zu bestätigen und neue Beweise für schon anerkannte Wahrheiten aufzufinden. Toricelli, der das Geständniss ablegt, dass Galilei die ganze Saat so zu sagen mit der Sense abgemäht und uns nur überlassen habe die Aehren zu sammeln, die er noch stehen gelassen oder weggeworfen habe[61]), wendete die Ideen Galilei's über die Eigenschaft der Schwere auf luftförmige Körper an und beseitigte durch seine Untersuchungen den bis dahin oft zur Erklärung verschiedener Phänomene herangezogenen „Horror vacui". Benedetto Castelli (1577—1644), ein anderer Schüler und treuer Anhänger Galilei's, versuchte in seinem im Jahre 1639 erschienenen Werke: „Della misura dell' Acque correnti", das Galilei in einem Briefe ein „wahrhaft goldenes"[62]) nennt, die allgemeinen Bewegungsgesetze auf die Bewegung des Wassers in Röhren anzuwenden; der italienische Astronom und Gegner des Kopernicus, Riccioli (1598—1671), arbeitete mit dem Jesuiten Francesco Grimaldi (1613—1663) daran, durch mannigfaltig abgeänderte Fallversuche mit Thonkugeln die Forschungen Galilei's immer mehr und mehr zu bestätigen. In Frankreich fand Galilei warme Vertheidiger seiner neuen Lehren in

---

[59]) Ibid. pag. 15. Una delle quali (difficoltà) è, che noi supponghiamo, che il piano orizontale, il quale non sia nè acclive nè declive, sia una linea retta; quasi che una simil linea sia in tutte le sue parti egualmente distante dal centro, il che non è vero; perchè partendosi dal suo mezzo va verso le estremità sempre più e più allontanandosi dal centro, e però ascendendo sempre; il che se tira in conseguenza esser impossibile, che il moto si perpetui, anzi che nè pur per qualche spazio si mantenga equabile, ma ben sempre vada languendo.

[60]) Opere di Galilei, vol. IX, pag. 19. E però per poter scientificamente trattar cotal materia bisogna astrar da essi (accidenti) e ritrovate e dimostrate le conclusioni astratte dagl' impedimenti servircene nel praticarle con quelle limitazioni, che l'esperienza ci verrà insegnando.

[61]) Toricellii opera geometrica, 1644, pag. 98. Fateor, quod ille (Galilei) totam hanc segetem tamquam falce demessuit, nec aliud superest nobis, nisi ut spicas colligamus, si quae ab ipso vel relictae fuerint vel abjectae.

[62]) Opere di Galilei, vol. X, pag. 130. Libretto veramente aureo.

Fermat (1601—1665), dem Parlamentsrath von Toulouse, und in Gassendi (1592 bis 1655), dem eifrigen Verfechter des Kopernicanischen Systems, während Dechales (1621—78) und Mersenne zur Ermittelung der Grösse und des Einflusses des Luftwiderstandes zahlreiche Versuche anstellten, ersterer mit Steinen, die er in einem Schachte von ungleichen Höhen fallen liess, wobei er sich zur Bestimmung der Fallzeiten eines Halbensecunden-Pendels bediente, letzterer mit Bleikugeln und Kieselsteinen, die er von einem 300 Fuss hohen Punkte des Domes von St. Peter in Rom herabfallen liess.