'Mechanische Operation' und 'mathematische Demonstration': Buonaiuto Lorini, Galileo Galilei und die Analogie von Maschinen- und Festungsbau

"Dann es billich heist amicus Plato,
amicus Aristoteles, sed magis amica VERITAS."[1]

Tobias Büchi

In der Kunst des Ingenieurs hat die Geometrie eine operative Funktion. Sie dient in verschiedenen Zusammenhängen dazu, etwas zu tun. Konstruiert der Ingenieur eine Festung oder eine Maschine, so denkt er durch die Gestalt auf dem Papier an das in Materie auszuführende Werk. Ähnliches tritt in der reinen Geometrie auf: Wird auf dem Papier ein Dreieck konstruiert, so denkt der Geometer durch sinnlich wahrnehmbare Gestalten an das ideale Dreieck, das durch diese Zeichnung intendiert wird. Wie der 'reine' Geometer muss der praktische Ingenieur über ein Wissen verfügen, das es ihm ermöglicht, das Mittel der Zeichnung richtig zu interpretieren und anzuwenden. Soll der Bauplan einer Festung nicht Spekulation bleiben, so muss der Ingenieur vor der Bauausführung möglichst allen Schwierigkeiten, die der Baustoff in Ausführung und Gebrauch einer Festung verursacht, Rechnung getragen haben. Diese Berücksichtigung ist im 16. Jahrhundert vorwiegend Sache persönlicher Erfahrung gewesen. Je mehr Personen in der Leitung und Überwachung eines immer differenzierteren Entscheidungs- und Bauprozesses involviert waren, desto grösser wurde das Bedürfnis, dieses Erfahrungswissen auf allgemeingültige Prinzipien abzustellen.

In seinen 1638 veröffentlichten *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche* hat Galileo Galilei (1564–1642) mit dem Bild zweier Knochen auf Probleme verwiesen, die im Maschinenbau auftreten.[2] (Abb. 1) Würde ein Mensch, ein Pferd oder eine Maschine ohne Änderung von Form und Material vergrössert, so würden diese Dinge in sich zusammenbrechen. Ein Mensch liesse sich nur zu einem Riesen vergrössern, wenn die Proportionen seiner Knochen dieser Vergrösserung angepasst würden. Die Form alleine ist unzureichend, das Verhalten materieller Gegenstände zu erfassen. Eine nach einem Modell ausgeführte

128 DIALOGO SECONDO

Dato il Cilindro A C, qualunque si sia il suo momento verso la sua resistenza, e data qualsi sia lunghezza D E, trouar la grossezza del Cilindro, la cui lunghezza sia D E, e'l suo momento verso la sua resistenza ritenga la medesima proporzione, che il momento del Cilindro A C alla sua.

Ripresa l'istessa figura di sopra e quasi l'istesso progresso diremo. Perche il momento del Cilindro F E al momento della parte D G, hà la medesima proporzione, che il Quadrato E D al Quadrato F G, cioè che la linea D E alla I, & il momento del Cilindro F G al momento del Cilindro A C, è come il Quadrato F D al Quadrato A B, cioè come il Quadrato D E al Quadrato I, cioè come il Quadrato I al Quadrato M, cioè come la linea I alla O, adunque ex æquali il momento del Cilindro F E al momento del Cilindro A C, hà la medesima proporzione della linea D E alla O, cioè del Cubo D E al Cubo I, cioè del Cubo di F D al Cubo di A B, cioè della resistenza della base F D alla resistenza della base A B, ch'è quello che si douea fare.

Or veggbino come dalle cose fin quì dimostrate apertamente si raccoglie l'impossibilità del poter non solamente l'arte, mà la natura stessa creser le sue machine à vastità immensa, si che impossibil sarebbe fabbricar Nauilii, Palazzi, e Templi vastissimi, le cui remi, antenne, trauamenti, catene di ferro, & in somma le altre lor parti consistessero: come anco non potrebbe la natura far alberi di smisurata grandezza, poiche i rami loro grauati dal proprio peso finalmente si staccherebbero; e parimente sarebbe impossibile far strutture di ossa per huomini, canalli, ò altri animali, che potessero sussistere, e far proporzionatamente gli ufficii loro, mentre tali animali si douesser' agumentare ad altezze immense, se già non si togliesse materia molto più dura, e resistente della consueta, à non si deformassero tali ossi proporzionatamente ingrossandogli, onde poi la figura, & aspetto dell'animale ne riuscisse mostruosamente grosso: il che forse fù auuertito dal mio accortissimo Poeta, mentre descriuendo vn grandissimo Gigante disse:

Non si può compartir quanto sia lungo,
Si smisuratamente è tutto grosso.

E per

DEL GALILEO. 129

E per vn breue esempio di quello che dico disegnai già la figura di vn'osso allungato solamente tre volte, & ingrossato con tal proporzione, che potesse nel suo animale grande far l'vfizio proporzionato à quel dell'osso minore nell'animal più piccolo, e le figure son queste: doue vedete proporzionata figura, che diuiene quella dell'osso ingrandito. Dal che è manifesto, che chi volesse mantener in vn vastissimo Gigante le proporzioni, che hanno le membra in vn huomo ordinario, bisognerebbe ò trouar materia molto più dura, e resistente per formarne l'ossa, ò vero ammettere, che la robustezza sua fusse à proporzione assai più facea, che ne gli huomini di statura mediocre; altrimente crescendogli à smisurata altezza si vedrebbono dal proprio peso opprimere, e cadere. Doue che all'incontro si vede nel diminuire i corpi non si diminuir con la medesima proporzione le forze, anzi ne i minori cresce la gagliardia con proporzion maggiore. Onde io credo che vn piccolo cane porterebbe addosso due, ò tre cani eguali à se, mà non penso già che vn cauallo portasse ne anco vn solo cauallo à se stesso eguale.

Simp. Nè si crede, grand' occasione mi danno da dubitare le moli immense, che vediamo ne i pesci, che tal Balena, per quanto intendo sarà grande per detti Elefanti, e pur si sostengono.

Salu. Il vostro dubbio S. Sim. mi fa accorgere d'una conditione da me non auuertita prima, potente essa ancora à far che Giganti,

R & altri

Abb. 1: Galileo Galilei, Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno à due nuoue scienze. Attenenti alla Mecanica & i Movimenti Locali, ..., Con una Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi., In Leida, Appresso gli Elsevirii. 1638., S. 128f. (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 5498, http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-3923)

Maschine funktioniert bei unveränderter Form und Materie nicht so wie ihr Modell. Trotzdem konnte Galileo behaupten, dass mit Hilfe der Geometrie bewiesen werden kann, in welcher Proportion das kleinere Modell stabiler ist als die grössere Maschine.[3]

In der Theorie der Festungsbaukunst ist eine Auseinandersetzung mit solchen Sachverhalten nicht in den Festungsbautraktaten von Galileo, sondern im 1596 in Venedig erschienen Festungsbuch von Buonaiuto Lorini (1540–1611) zu finden.[4] Unter der Aufsicht von Giulio Savorgnano (1510–1595) ist Lorini ab 1593 an der Planung und Errichtung der venezianischen Festung Palmanova beteiligt.[5] (Abb. 2) Weil in Maschinen- und Festungsbau ähnliche Probleme auftreten, widmet Lorini das ganze fünfte Buch seines Traktats dem Maschinenbau. Er stellt Maschinen nicht nur wie üblich durch Bilder vor, sondern er gibt in kurzer Form die theoretischen Grundlagen der Mechanik und will dazu lediglich die Mechanik von Guidobaldo del Monte (1545–1607) und die Aristoteles zugeschriebenen *Mechanica Problemata* verwendet haben.[6]

Nach Guidobaldo hat Aristoteles die Mechanik auf das physikalische Prinzip kreisförmiger Bewegung reduziert und Archimedes dieses physikalische Prinzip mathematisch einwandfrei demonstriert. Die Gegenstände der Mechanik sind

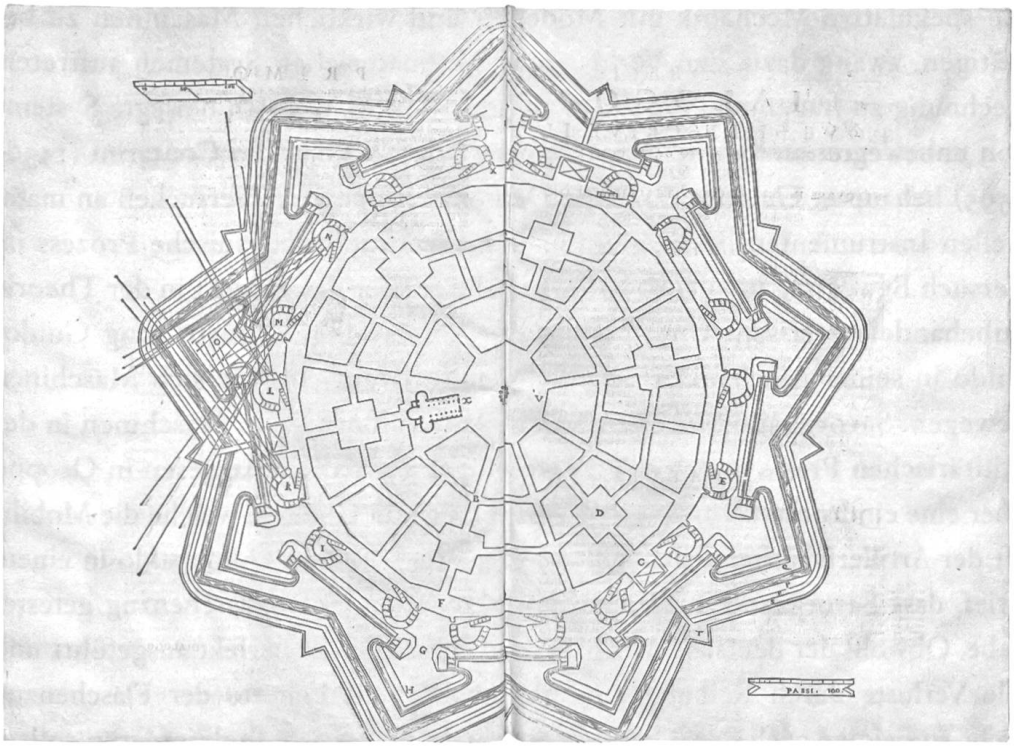


Abb. 2: Kritischer Plan von Palmanova, in: Buonaiuto Lorini, Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' qvali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti …, Nvovamente dati in luce., In Venetia, Appresso Gio. Antonio Rampazetto., 1597 (Kolophon S. 220: IN VENETIA, Appresso Gio. Antonio Rampazetto. MD XCVI), S. 50–51 (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 9401 q)

Gegenstände der aristotelischen Physik. Ihre Methode entlehnt sie der Geometrie. Damit wäre die Mechanik eine kontemplative Wissenschaft, die zwischen Physik und Mathematik vermittelnd zur Metaphysik führte.[7]

Lorini dürfte die von Filippo Pigafetta (1533–1604) im Auftrag von Savorgnano angefertigte italienische Übersetzung der Mechanik von Guidobaldo aus dem Jahr 1581 benutzt haben.[8] Im Vorwort und im Kommentar geht Pigafetta von einem engeren Zusammenspiel von kontemplativer Wissenschaft und zweckgerichtetem Handwerk aus als Guidobaldo. Es sei der Ingenieur, der sowohl zwischen antiker Physik und Mathematik als auch zwischen Wissenschaft und Handwerk vermittle, ohne selbst handwerklich tätig werden zu müssen.[9]

Diese veränderte Einschätzung des Verhältnisses von Theorie und Praxis dürfte auf einen Briefwechsel zurückzuführen sein, der 1580 anlässlich der Übersetzung der Mechanik von Guidobaldo geführt worden ist.[10] Der Versuch,

die spekulative Mechanik mit Modellen und wirklichen Maschinen zu bestätigen, zwang dazu, den Verlusten, die in materiellen Systemen auftreten, Rechnung zu tragen und die Frage zu beantworten, wie sich bewegte Systeme von unbewegten unterscheiden. In einem Brief an Giacomo Contarini (1536–1595) behauptet Guidobaldo, seine Demonstrationen mit Versuchen an materiellen Instrumenten bestätigt zu haben. Wenn der mechanische Prozess im Versuch Bewegung involviert habe, so habe er aber das Subjekt in der Theorie unbehandelt gelassen. Über vereinzelte Anmerkungen hinaus ging Guidobaldo in seiner Mechanik tatsächlich kaum darauf ein, wie sich Maschinen bewegen. Savorgnano hingegen war an Anwendungen von Maschinen in der militärischen Praxis interessiert. Er verfügte auf seinem Anwesen in Osoppo über eine eindrucksvoll arrangierte Sammlung von Geräten, welche die Mobilität der Artillerie sicherstellen sollten. Pigafetta berichtet Guidobaldo in einem Brief, dass Savorgnano in Osoppo unter anderem einen Flaschenzug getestet habe. Obwohl der deutsche Mechaniker das Instrument perfekt ausgeführt und alle Verluste durch Reibung minimiert habe, funktionierte der Flaschenzug nicht so, wie er nach der Theorie von Guidobaldo hätte funktionieren sollen. Das Gewicht habe nicht der angewandten Kraft und die Erfahrung (esperienza) nicht der Vorausberechnung (ragione) entsprochen. In einem Brief an Pigafetta bemerkt Guidobaldo, dass Contarini ähnliche Zweifel an seiner Theorie geäussert habe. Wie in einem Brief an Contarini schreibt Guidobaldo den Fehler der Versuchsanordnung zu. Die von den Achsen und Seilen eines Flaschenzuges verursachte Reibung habe nur einen Einfluss auf das System, wenn dieses dazu verwendet werde, eine Last zu bewegen. In ruhenden Systemen sei die Materie keine Ursache von Verlusten.

Maschinen wurden zumeist nicht nach Plänen, sondern nach Modellen gebaut. Lorini warnt nachdrücklich davor, solchen Modellen allzu sehr zu vertrauen. Das Verhältnis der Längen zu den Volumen und damit den Gewichten einzelner Maschinenteile verändert sich bei Vergrösserung eines Modells nicht proportional zu dieser Vergrösserung. Die innere Reibung, das Eigengewicht und die Steifigkeit einzelner Maschinenteile verhalten sich im Modell nicht so wie in einer wirklichen Maschine.

Der Unterschied zwischen einem rein spekulativ tätigen Mathematiker und einem praktischen Mechaniker entsteht nach Lorini, weil die Demonstrationen und Proportionen, die zwischen imaginären Linien, Flächen und Körpern gelten, nicht exakt zutreffen, wenn sie auf materielle Dinge übertragen werden. Die mentalen Konzepte des 'reinen' Mathematikers sind den

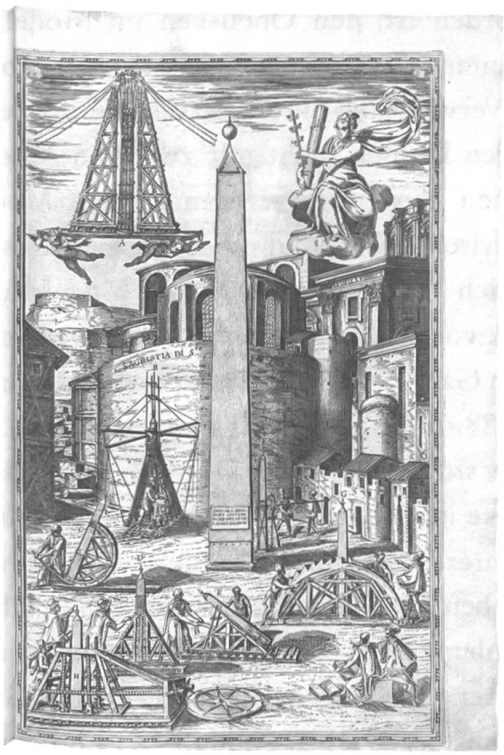


Abb. 3: Wettbewerbsmodelle, in: Domenico Fontana, Della Trasportatione dell'obelisco vaticano et delle fabriche di nostro signore Papa Sisto ·V· ..., Libro primo, In Roma Appresso Domenico Basa. 1590, Fol. 8r (B2a) (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 2220 fol., http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-117)

Hindernissen, welche die Materie mit sich bringt, nicht unterworfen. Während der 'reine' Mathematiker sich die Teile einer Maschine ohne Schwere vorbilden könne, müsse der Verstand des Mechanikers darin bestehen, die Beschwerlichkeiten, welche die Materie mit sich bringt, vorherzusehen, um damit dem Unterschied zwischen idealem Konzept und materiellem System Rechnung zu tragen.[11]

Lorini folgt mit dieser Einschätzung des Unterschiedes zwischen reiner und angewandter Mathematik Pigafettas Anmerkungen in der Übersetzung der Mechanik von Guidobaldo, die sich auf den erwähnten Briefwechsel beziehen.[12] Er dürfte sich aber auch auf ein weiteres Ereignis bezogen haben: Viele Beiträge des Wettbewerbs für den Transport des Vatikanischen Obelisken wurden in Modellform präsentiert.[13] (Abb. 3) Die meisten dieser Modelle vernachlässigten die Schwierigkeiten, die sich durch eine Vergrösserung der dargestellten Maschine ergeben. Um die Kräfte im Modell proportional zu halten, stellte Domenico Fontana (1543–1607), der 1586 zum Leiter des

Projekts ernannt worden ist, den Obelisken im Modell durch Blei dar.[14] Damit korrigierte Fontana die Unterschiede zwischen Modell und wirklicher Maschine durch die Verwendung eines spezifisch schwereren Materials.

Solche Korrekturen können nicht nur zwischen Modell und Maschine, sondern auch zwischen idealem Gesetz und einem Modell vorgenommen werden, das der empirischen Bestätigung des idealen Gesetztes dient. Unter anderem damit hat sich Lorini in seinem Maschinenbautraktat beschäftigt, das mit der Mechanik von Galileo zusammenzuhängen scheint.[15]

Die Mechanik von Galileo ist erst 1634 in französischer Übertragung von Marin Mersenne (1588–1648) publiziert worden.[16] Eine frühe Manuskriptform kann aber relativ sicher in die Jahre 1593 und 1594 datiert werden. Eine ausgearbeitete Variante ist ein bis drei Jahre vor 1600 entstanden.[17] Berücksichtigt man den Kontext, so könnten Galileo und Lorini auch unabhängig voneinander zu ähnlichen Resultaten gekommen sein. In ähnlichen Kontexten führen ähnliche Probleme zu ähnlichen Lösungen. Vieles spricht aber für eine direkte, möglicherweise gegenseitige Rezeption. Sicher aber hat ein indirekter Gedankenaustausch über Guidobaldo und Savorgnano oder die Kreise um Contarini und Giovan Vicenzo Pinelli (1535–1601) stattgefunden.[18]

Wie Guidobaldo reduzierten Lorini und Galileo alle komplexen Maschinen auf Hebel und Waage. Im Korollar der ersten Proposition untersucht Lorini den Fall des Gleichgewichts von ungleichen Gewichten an ungleichen Hebelarmen. Wie in Geometrietraktaten üblich, stellt er die behandelten Gegenstände durch Zeichnungen vor. Der Hebel ist durch eine Linie, das Auflager durch ein Dreieck und die Gewichte sind durch Kreise dargestellt. (Abb. 4) Zunächst hat Lorini das Eigengewicht des Balkens nicht berücksichtigt. Ungleiche Gewichte an ungleichen Hebelarmen verhalten sich im idealen, durch die Zeichnung repräsentierten System im Gleichgewichtsfall umgekehrt proportional. Lorini konnte das Gesetz mit Verweis auf Archimedes voraussetzen. Im Gegensatz zu Guidobaldo hat Lorini die wirkende Kraft ("Macht") so definiert, dass der Fall des statischen Gleichgewichts auf den Bewegungsfall übertragen werden kann: "Die Macht/ ist das Vermögen so der Bewegunge einen Anfang machet/ welches die Stärck eines oder mehrer Männer oder Thiere seyn kan."[19]

Es bleibt dabei unklar, ob das Wort 'Macht' angewandte Kraft bedeutet oder ob damit bezeichnet wird, was eine gegebene Kraft durch eine Maschine verrichten kann. Lorinis Begriff 'Macht' (possanza) ist oft kaum vom ebenso mehrdeutigen Begriff 'Moment' (momento) zu unterscheiden, der von Galileo in der Mechanik verwendet worden ist.

QVINTO. 173

RAZI.

Sono que' mezi diametri di legno, che con vna delle sue teste tien ferma la circonferenza della ruota, e massime de' carri: e l'altra vien fitta nel dado di mezo, per il centro delquale passa l'asse, che poi sostenta la ruota co'l peso del carro, ò d'altro strumento.

DELLA LIEVA.

PROPOSITIONE I.

DOVENDO noi venire a trattar della lieua, prima presupporremo con Archimede nel primo Libro dell'equiponderanti, che i pesi eguali appiccati in distanze eguali, pesino egualmente.

Come se per essempio hauessimo la linea AB sostenuta nel mezo dal sostegno C nella cui estremità siano i pesi eguali EF questi pesaranno egualmente, si che la lieua starà equilibrata sopra al piano del suo orizonte senza inchinare più da vna parte, che dall'altra. Di maniera, che potremo similmente dire, che la forza posta in B per sostentare il peso E deue essere ad esso eguale, nè che la lieua così vsata ci dia alcuno aiuto.

COROLLARIO.

Dalle cose dichiarate è manifesto, che quanto più si allontanerà la forza dal sostegno, ouero ad esso si auuicinerà il peso, cõ tanto minore, ouero maggior forza sarà sostenuto, perche crescendo per essempio la distanza CB, ouero diminuendo la CA si verrà con l'istessa proportione a diminuire la forza del peso, si che possa venir proportionato con la possanza B.

Et accioche quanto si è detto più sensatamente si comprenda, hò voluto soggiungere la seguente figura, per laquale viene rappresentata vna lieua materiale, che sarà la segnata AB, sostentata nel centro I, la cui distanza IA sia diuisa in sei parti eguali, cioè ID, HG, FE, A, e che qual se l'vna di esse parti, siano eguali alla IC, dico che la linea AB sarà come si disse, equilibrata co' due pesi LM, ma leuando poi vno di essi, cioè il segnato M, crestando L al suo luogo, la possanza che lo

douerà sostentare posta alla testa della lieua in A verrà a sentir tanto manco, quanto sarà la proportione tra CI, & IA, doue che essa possanza A verrà a esser vn sesto. E però sendo la detta possanza A di libre cinquanta ne sostenterà in C trecento, equilibrando però il peso della lieua BI l'altra parte IA, si che la grauezza della sua materia non apporta alteratione alcuna, che non ci essendo la parte BC saria la grauezza della parte IA per augmento della possanza A, e se essa possanza sarà posta in E, douerà essere di libre sessanta, perche così è la proportione della distanza tra il sostegno I, e peso C alla distanza IE, cioè di cinque volte di più, che multiplicate per sessanta faranno trecento, come si disse essere il peso, e se in F sarà settantacinque, & in G di libre cento, & in H di cento cinquanta. Ma sendo in D sarà trecento, eguale al peso, come si propose.

Q 2 PROPO-

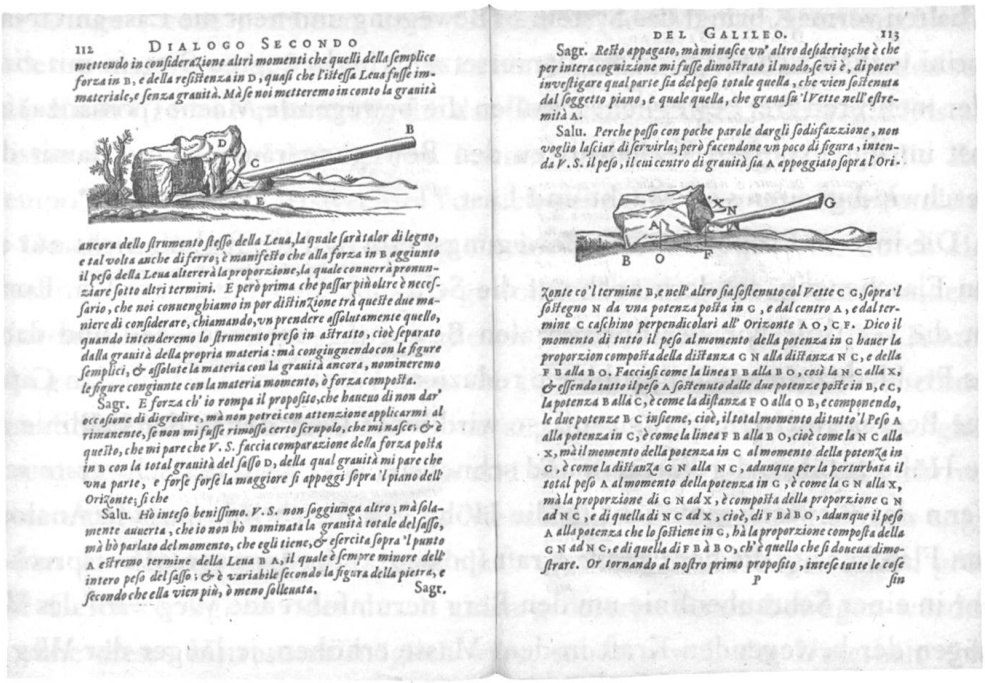
Abb. 4: Abstrakter und materieller Hebel, in: Buonaiuto Lorini, Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' qvali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti …, Nvovamente dati in luce., In Venetia, Appresso Gio. Antonio Rampazetto., 1597 (Kolophon S. 220: IN VENETIA, Appresso Gio. Antonio Rampazetto. MD XCVI), S. 173 (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 9401 q)

Wie Lorini hat Galileo in der ersten Fassung seiner Mechanik das Hebelgesetz nicht bewiesen, sondern nur festgestellt, dass das von Archimedes angegebene Gesetz weder der Erfahrung ("esperienza" bzw. "sperienza") noch der Vernunft ("intelletto" bzw. "ragione") widerspreche.[20] Guidobaldo hatte das Verhältnis von Kraft und Gewicht für das ruhende System richtig formuliert, aber behauptet, dass im bewegten Hebel das Verhältnis des Bewegungsraumes der bewegenden Potenz zum Bewegungsraum der bewegten Last grösser sei als das Verhältnis von Last und Potenz.[21] Indem Galileo von materiellen Systemen abstrahiert und den Unterschied von ruhendem und bewegtem System minimiert, konnte er den von Archimedes und Guidobaldo mathematisch exakt formulierten Gleichgewichtsfall schon 1594 auf Maschinen in Bewegung übertragen: Ein auf einer Seite angehängtes unfühlbares Gewicht ("insensibile peso") oder ein minimales Moment ("minimo momento") würde einen materielosen Hebel in Bewegung versetzen.[22] Die verschwindend kleine Ursache dieser Bewegung ist im Prinzip nicht von den

Gewichten oder Momenten zu unterscheiden, die materielose Hebel im Gleichgewicht halten.[23] Ist der Übergang von ruhendem und bewegtem System auf Regeln gebracht, so kann das in der aristotelischen Mechanik enthaltene Gesetz, das besagt, dass sich im Hebel die Wege und damit die Geschwindigkeiten der Bewegungen proportional zu den Hebelarmen und umgekehrt proportional zu den Gewichten verhalten, ohne Schwierigkeiten auf den ruhenden Hebel übertragen werden.

Während Galileo von der Materie des Instruments und von allen möglichen Verlusten abstrahierte, korrigierte Lorini das materielle System so, dass es dem idealen so weit als möglich entspricht. "Mathematische beweise" ("dimostrazione Matematica") zeigen zwar "nohtwendig", dass sich die Kraft zum Gewicht umgekehrt proportional zu den Hebelarmen verhält; wenn man aber "in der Matery den Versuch thut" ("esperienza in materia"), muss auch das verschiedene Eigengewicht der ungleich langen Hebelarme berücksichtigt werden.[24] Wenn wirklich ungleiche Gewichte an ungleich langen materiellen Hebelarmen aufgehängt werden, so 'verfälscht' das Eigengewicht des beiderseits des Auflagers ungleich langen Balkens das errechnete Resultat. Im materiellen System wird die grössere Schwere (gravezza) des längeren Hebelarms die Macht (possanza) des weiter vom Drehpunkt entfernten Gewichts derart vergrössern, dass das System in Bewegung kommt, obwohl es nach dem idealen Hebelgesetz in Ruhe sein müsste.[25] Soll das Gesetz des Gleichgewichts von ungleichen Gewichten an ungleichen Hebelarmen durch ein materielles Instrument, das Lorini durch eine Axonometrie vorstellt, (Abb. 4) bestätigt werden, so muss die Stange, an der die Gewichte aufgehängt werden, auf beiden Seiten des Drehpunktes gleich lang sein, damit sich ihr Eigengewicht aufhebt. Damit das ideale Hebelgesetz erfüllt wird, muss das materielle System des Instruments einer Korrektur unterworfen werden, die den Einfluss der für das Gesetz irrelevanten Materie aufhebt.

Der Unterschied von idealem und materiellem Hebel kann in der Praxis genutzt werden. Man denke zum Beispiel an eine Darstellung eines Stemmeisens in Galileos *Discorsi*. (Abb. 5) Galileo hat mit diesem Beispiel zwischen absolutem Verhalten der abstrakten Maschine und zusammengesetzten Momenten oder Kräften unterschieden, die in materiellen Maschinen auftreten. Die Wirkung eines Stemmeisens ist grösser, als das ideale Hebelgesetz vorschreibt, weil auf der Seite der bewegenden Kraft mehr Materie vorhanden ist, als auf der Seite der zu bewegenden Last. Diesen Sachverhalt hat man in der Praxis mit einer Verdickung des längeren Hebelarms schon lange vor jeder mathematischen Theorie der Mechanik zu nutzen gewusst.



112 DIALOGO SECONDO

mettendo in consideratione altri momenti che quelli della semplice forza in B, e della resistenza in D, quasi che l'istessa Leua fusse immateriale, e senza gravità. Mà se noi metteremo in conto la gravità

ancora dello strumento stesso della Leua, la quale sarà talor di legno, e tal volta anche di ferro; è manifesto che alla forza in B aggiunto il peso della Leua altererà la proporzione, la quale converrà pronunziare sotto altri termini. E però prima che passar più oltre è necessario, che noi conuenghiamo in por distinzione trà queste due maniere di considerare, chiamando, vn prendere assolutamente quello, quando intenderemo lo strumento preso in astratto, cioè separato dalla gravità della propria materia: mà congiungendo con le figure semplici, & assolute la materia con la gravità ancora, nomineremo le figure congiunte con la materia momento, ò forza composta.

Sagr. E forza ch' io rompa il proposito, che haueua di non dar' occasione di digredire, mà non potrei con attenzione applicarmi al rimanente, se non mi fusse rimosso certo scrupolo, che mi nasce, & è questo, che mi pare che V. S. faccia comparazione della forza posta in B con la total gravità del sasso D, della qual gravità mi pare che vna parte, e forse forse la maggiore si appoggi sopra 'l piano dell' Orizonte; si che

Salu. Hò inteso benissimo. V. S. non soggiunga altro; mà solamente auuerta, che io non hò nominata la gravità totale del sasso, mà hò parlato del momento, che egli tiene, & esercita sopra 'l punto A estremo termine della Leua B A, il quale è sempre minore dell' intero peso del sasso; & è variabile secondo la figura della pietra, e secondo che ella vien più, ò meno sollevata. Sagr.

DEL GALILEO. 113

Sagr. Resto appagato, mà mi nasce vn' altro desiderio; che è che per intera cognizione mi fusse dimostrato il modo, se vi è, di poter' investigare qual parte sia del peso totale quella, che vien sostenuta dal soggetto piano, e quale quella, che grana su 'l Vette nell' estremità A.

Salu. Perche posso con poche parole dargli sodisfazzione, non voglio lasciar di servirla, però facendone vn poco di figura, intenda V. S. il peso, il cui centro di gravità sia A appoggiato sopra l'Orizonte co 'l termine B, e nell' altro sia sostenuto col Vette C G, sopra 'l sostegno N da vna potenza posta in G, e dal centro A, e dal termine C caschino perpendicolari all' Orizonte A O, C F. Dico il momento di tutto il peso al momento della potenza in G hauer la proporzion composta della distanza G N alla distanza N C, e della F B alla B O. Facciasi come la linea F B alla B O, così la N C alla X, & essendo tutto il peso A sostenuto dalle due potenze poste in B, e C, la potenza B alla C, è come la distanza F O alla O B, e componendo, le due potenze B C insieme, cioè, il total momento di tutto 'l Peso A alla potenza in C, è come la linea F B alla B O, cioè come la N C alla X, mà il momento della potenza in C al momento della potenza in G, è come la distanza G N alla N C, adunque per la perturbata il total peso A al momento della potenza in G, è come la G N alla X, mà la proporzione di G N ad X, è composta della proporzione G N ad N C, e di quella di N C ad X, cioè, di F B à B O, adunque il peso A alla potenza che lo sostiene in G, hà la proporzione composta della G N ad N C, e di quella di F B à B O, ch' è quello che si doueua dimostrare. Or tornando al nostro primo proposito, intese tutte le cose

P fin

Abb. 5: Galileo Galilei, Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno à due nuoue scienze. Attenenti alla Mecanica & i Movimenti Locali, ..., Con una Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi., In Leida, Appresso gli Elsevirii. 1638., S. 112–113 (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 5498, http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-3923)

Wie Guidobaldo haben Lorini und Galileo den Flaschenzug auf den Hebel reduziert.[26] Mit einer einfachen, fixen Umlenkrolle kann eine Kraft ein ihr gleiches Gewicht im Gleichgewicht halten. Das Instrument entspricht der Waage. Mit Addition einer beweglichen Rolle vermag die eine bestimmte Kraft doppelt so viel Gewicht im Gleichgewicht zu halten.

Guidobaldo war der Meinung, dass im idealen bewegten System mit mehr als einer Umlenkrolle das Verhältnis des Bewegungsraumes der bewegenden Potenz zum Bewegungsraum der angehobenen Last grösser ist als jenes von Last und Potenz und konnte darum den Gleichgewichtsfall nicht richtig auf den bewegten Flaschenzug übertragen.[27] Wird eine Last von dieser Maschine angehoben, dann geht nach Guidobaldo über Verluste wie Reibung hinaus Kraft oder – noch problematischer – Raum verloren.

Während Galileo den Übergang von ruhendem und bewegtem System anhand des Hebels exemplifiziert, erläutert Lorini dieselbe Erkenntnis anhand des Flaschenzugs: Der geringste Zusatz an Kraft über jene Kraft hinaus, die an einem perfekt ausgeführten Flaschenzug die Last im Gleichgewicht

zu halten vermag, bringt das System in Bewegung und hebt die Last an.[28] Nach Lorini verhält sich unter dieser Voraussetzung im bewegten System mit einer oder mehreren frei beweglichen Rollen die bewegende Macht (possanza) zur Last im umgekehrten Verhältnis zu den Bewegungsräumen und damit den Geschwindigkeiten von Macht und Last.[29]

Die inverse Proportion von Bewegungsraum und Kraft kann nicht nur auf den Flaschenzug, sondern auch auf die Schraube übertragen werden. Lorini hat die vertikale von der horizontalen Bewegung unterschieden und damit das Problem auf zwei Teilprobleme reduziert: Wenn eine Last auf den Gipfel eine Berges geschafft werden soll, so wird jener Weg, der in der Falllinie auf die Höhe zuführt, der kürzeste und schnellste, aber auch der schwerste sein. Wenn das Gewicht senkrecht in die Höhe gehoben wird, muss in Analogie zum Flaschenzug die bewegende Kraft (possanza) der Last (peso) entsprechen. Der in einer Schraubenlinie um den Berg herumführende Weg wird das Vermögen der bewegenden Kraft in dem Masse erhöhen, je länger der Weg ist und je langsamer er zum Ziel führt.[30] Wird eine Last horizontal verschoben, so wird aus Gründen der Reibung die Kraft das Vierfache ziehen können. Wird die Reibung dadurch vermindert, dass die Last auf Rollen oder Räder gelegt wird und die Strasse möglichst glatt ist, so kann die Macht das 24-fache der Last bewegen. Im Gegensatz zu Galileo ist Lorini nicht auf den Idealfall eingegangen, aber das 'unbezweifelbare Axiom' von Galileo ist die Konsequenz der ganzen Untersuchung: "Dal che possiamo priendere, come per assioma indubitato, questa conclusione: che i corpi gravi, rimossi tutti l'impedimenti esterni ed adventizii, possono esser mossi nel piano dell'orizonte da qualunque minima forza."[31]

Aus dem Verhältnis von senkrechtem und waagrechtem Weg konnte Lorini das Verhältnis der Kräfte bestimmen, durch das die Macht (potenza), die erforderlich ist, um ein gegebenes Gewicht mit der Schraube zu heben, für jede Elevation bestimmt werden kann.[32]

Galileo wendet sich im einführenden Abschnitt der ausgearbeiteten Fassung seiner Mechanik gegen den Glauben praktischer Mechaniker ("artifici")[33], dass die Natur überwunden werde, wenn durch Maschinen mit wenig Kraft grosse Gewichte angehoben würden.[34] Der Vorteil, den eine Maschine bietet, ist, dass ein gegebenes Gewicht mit einer gegebenen Kraft an einen gegebenen Ort in einem Stück statt in mehreren der Kraft entsprechenden Stücken transportiert werden kann. Dasselbe Gewicht könnte in gleiche Teile zerlegt ohne jede Maschine mit derselben Kraft in derselben Zeit über dieselbe Distanz bewegt werden.[35]

Vier Dinge ("cose") müssen nach Galileo in der Mechanik unterschieden werden: 1. das Gewicht ("peso"), das an einen anderen Ort bewegt werden soll; 2. die Kraft ("forza o potenza"), die das Gewicht bewegen soll; 3. die Distanz ("distanza") zwischen den beiden Termini der Bewegung und 4. die Zeit ("tempo"), in der der Ortswechsel vor sich geht. Aus Weg und Zeit resultiert die Geschwindigkeit der Bewegung ("velocità del moto").[36] Was durch eine Maschine an einer dieser Grössen gewonnen wird, geht an einer anderen verloren. Galileo wollte sich mit diesen Feststellungen gegen die Träume nicht genannter Ingenieure wenden, die sich am unmöglichen Unternehmen versucht hätten, durch eine Maschine zugleich Kraft und Geschwindigkeit zu vermehren. Die Kraft von Tieren und die Kraft des Wassers sei nicht von grösserem Nutzen als die Kraft des Menschen, weil damit Maschinen angetrieben werden könnten, die das gleiche Gewicht mit weniger Kraft, grösserer Geschwindigkeit oder durch einen grösseren Raum bewegen würden, als ohne dieses Instrument möglich wäre, sondern weil der Unterhalt eines Pferdes und die Kraft des Wassers weniger koste, als wenn dieselbe Kraft durch Menschen geleistet würde.[37]

Galileo dürfte sich mit dieser Kritik auf Lorini bezogen haben, denn dieser versuchte zu zeigen, wie mit einer Maschine zugleich grosse Kraft und hohe Operationsgeschwindigkeit zu haben ist. Nach Lorini ist die Sache aber ausschliesslich eine Frage der antreibenden Kraft.[38] Wenn grosse antreibende Kräfte zur Verfügung stehen, kann die Kraftübersetzung einer Maschine umgekehrt werden, so dass auf Kosten der Kraft eine hohe Operationsgeschwindigkeit erreicht werden kann.[39] Verglichen mit der Kraft von Tier und Mensch eigne sich die Kraft des fliessenden Wassers besser dazu, eine Maschine anzutreiben, denn durch die Geschwindigkeit des fliessenden Wassers werde die Geschwindigkeit der Maschine und durch das Gewicht des Wassers werde die Kraft der Maschine vermehrt.[40] Weil die Kraft des Wassers verglichen mit der Kraft des Menschen eine sehr grosse ist, lässt sich durch die antreibende Kraft des Wassers Operationsgeschwindigkeit und Kraft einer Maschine erhöhen.

Zu einer Mühle mit horizontalem Schwungrad schreibt Lorini, dass das Geheimnis aller Erfinder von Mühlen und anderen Maschinen der Versuch sei, Kraft und Geschwindigkeit zusammenzubringen ("acco[m]pagnare la forza co[n] la velocità").[41] Dies könne erreicht werden, wenn ein grosses Gewicht in schnelle kreisförmige Bewegung gebracht wird. Mit einem Schwungrad könne man sich mit Hilfe der Kunst der natürlichen Kraft des Wassers annähern.[42]

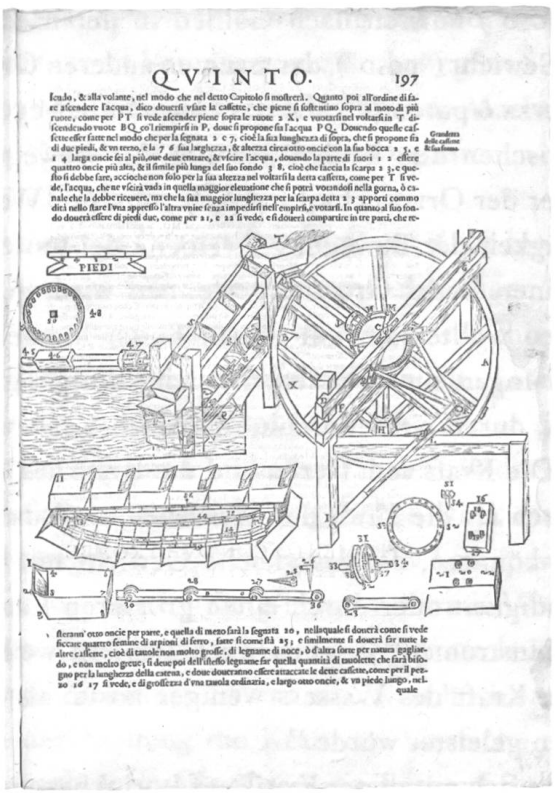


Abb. 6: Eimerwerk mit Schwungrad, in: Buonaiuto Lorini, Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' qvali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti ..., Nvovamente dati in luce., In Venetia, Appresso Gio. Antonio Rampazetto., 1597 (Kolophon S. 220: IN VENETIA, Appresso Gio. Antonio Rampazetto. MD XCVI), S. 197 (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 9401 q)

Zu einem Wasserschöpfgerät mit Schwungrad und doppeltem Schaltwerk meint Lorini, (Abb. 6) dass die Macht (possanza), mit der durch diese Maschine Wasser angehoben werden kann, vervielfältigt ("multiplicare") werden könne, wenn man zusätzlich zur antreibenden Kraft (forza) ein Schwungrad so anordne, dass die schnelle Kreisbewegung dieses schweren Körpers die antreibende Kraft in Proportion seiner Bewegung begleite.[43] Durch die komplexe Maschine mit dazwischen geschaltetem Schwungrad aus Blei kann eine ungleichförmige Bewegung in eine gleichförmige transformiert werden. Die ungleichmässig angewandte Kraft wird in dieser Maschine durch einen Hebel und ein doppeltes Schaltwerk auf ein Schwungrad übersetzt und damit in eine gleichmässige Bewegung transformiert. Die schnelle kreisförmige Bewegung des grossen Gewichts lässt sich wiederum in eine Kraft transformieren, die eine Eimerkette antreibt. Die Macht des Schwungrades hilft der

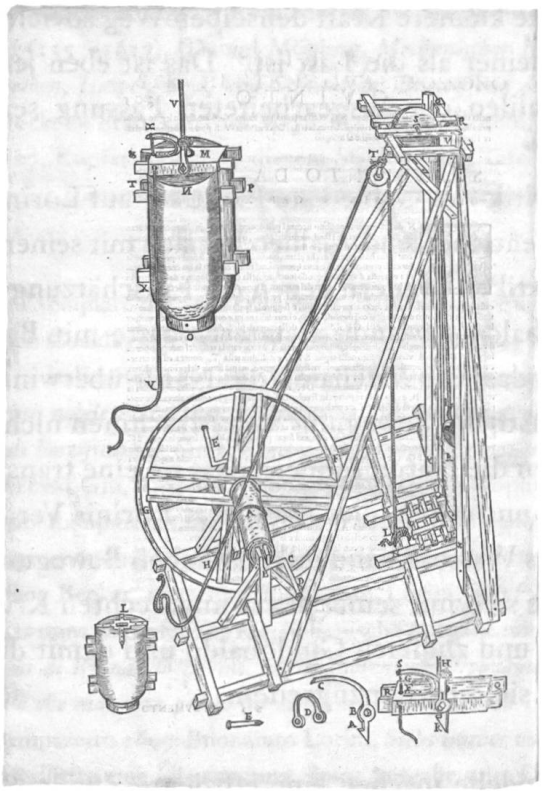


Abb. 7: Ramme mit Schwungrad, in: Buonaiuto Lorini, Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' qvali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti ..., Nvovamente dati in luce., In Venetia, Appresso Gio. Antonio Rampazetto., 1597 (Kolophon S. 220: IN VENETIA, Appresso Gio. Antonio Rampazetto. MD XCVI), S. 206 (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 9401 q)

antreibenden Macht, indem diese jene begleitet.[44] Man könnte meinen, dass man sich auf diese Weise einem perpetuum mobile annähere.[45] Ein perpetuum mobile sei aber ein unmögliches Ding.[46]

Das Prinzip, Energie mit einem Schwungrad zu speichern, hat Lorini auch anhand einer mit einem Schwungrad kombinierten Ramme gezeigt.[47] (Abb. 7) Die Macht oder das Moment eines Schwungrades lässt sich schrittweise erhöhen. Wenn die grosse Last des Schwungrades in schnelle kreisförmige Bewegung gebracht worden ist, kann die gespeicherte Energie auf das Seil übertragen werden und den Rammbär hochheben. Die schnelle Bewegung einer Last wird dabei in eine langsame Bewegung einer grösseren Last transformiert. Wenn eine gegebene Kraft eine grössere Last eine bestimmte Strecke verschieben soll, kann die Last in einzelne Stücke zerlegt werden, die diese Kraft ohne die Hilfe einer Maschine bewegen kann. Die Theorie zeigt nun,

dass in diesem Fall die kleinere Kraft denselben Weg sovielmal mehr zurücklegen muss, als sie kleiner als die Last ist.[48] Das ist eben jene grundsätzliche Betrachtung, die Galileo der ausgearbeiteten Fassung seiner Abhandlung vorausgeschickt hat.[49]

Wenn sich die Kritik von Galileo am Praktiker auf Lorini bezogen hat, so trifft sie diesen nicht entscheidend. Galileo hat sich mit seiner Kritik eigentlich nicht gegen den Praktiker, sondern gegen die Einschätzung der Praxis in der Theorie von Guidobaldo gewandt. Letzterer hatte mit Bezug auf Autoren der Antike geglaubt, dass die Mechanik die Natur überwindet.[50] Galileo hat gezeigt, dass die 'künstliche Bewegung' von Maschinen nicht eine Bewegung ausserhalb oder gegen die Natur, sondern dass sie eine transformierte 'natürliche Bewegung' ist, und genau dies impliziert Lorinis Vergleich der 'natürlichen Bewegung' des Wassers mit der 'künstlichen Bewegung' des Schwungrades. Galileo konnte sich mit seiner etwas ungerechten Kritik am Ingenieur über diesen erheben und zugleich Guidobaldo und damit die antike Mechanik kritisieren, ohne sie direkt anzugreifen.

Zeichnungen und Modelle machen eine effiziente Zusammenarbeit von Festungsingenieur, militärischer Führung, Administration und ausführendem Handwerker erst möglich. Je komplexer Planungs- und Bauprozesse wurden, desto präziser mussten architektonische Zeichnungen und Modelle, die diese Prozesse koordinieren, zwischen geistigen Konzepten und materieller Wirklichkeit vermitteln. Daher wurden diese Mittel Ende des 16. Jahrhunderts in der Festungsbautheorie zu einem Gegenstand theoretischer Untersuchungen. Nicht nur die 'Geometrie' einer Festung wurde analysiert, auch erörterte man ausführlich die Frage, wie geometrische Gesetzmässigkeiten, architektonische Zeichnung, materielles Modell und materielle Wirklichkeit miteinander zusammenhängen. Weil das naturwissenschaftliche Erfahrungsexperiment eine Art Modell ist, hat diese in praktischer Absicht geleistete Klärung des Zusammenhangs von Geometrie, Modell und Wirklichkeit eine nicht zu unterschätzende Rolle in der Entstehung der modernen Naturwissenschaften gespielt.

1 Daniel Mögling in der Übersetzung des Kommentars der aristotelischen *Mechanica Problemata* von Bernardino Baldi (1553–1617). (Daniel Mögling, *Mechanischer Kunst-Kammer Erster Theil, Von Waag, Hebel, Scheiben, Haspel, Keyl, vnd Schrauffen: Begreiffend die wahre Fundamenta aller Machination.* ..., Gedruckt zu Franckfurt am Mayn, bey Caspar Röteln, Jn Verlegung MATTHÆI MERIANI 1629, S. 127; Kupfertitel, cf. in diesem *SCHOLION*, Tafel I).

2 Galileo Galilei, *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze*, Bologna: Dozza 1655, S. 97.

3 Id., S. 2.

4 Nach Cockle sind die Exemplare der sehr seltenen 1. italienischen Ausgabe Widmungsexemplare (Maurice James Draffen Cockle, *A bibliography of military books up to 1642*, London: The Holland Press 1957, Nr. 791). 2. italienische Auflage in fünf Büchern: Buonaiuto Lorini, *Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' qvali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti* ..., Nvovamente dati in luce., In Venetia, Appresso Gio. Antonio Rampazetto., 1597 (Kolophon S. 220: IN VENETIA, Appresso Gio. Antonio Rampazetto. MD XCVI) (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 9401 q). Dieser Auflage entsprechen: Buonaiuto Lorini, *Fünf Bücher vom Festungsbauen*, Frankfurt am Main: Mathäus Becker 1607 und Buonaiuto Lorini, *Fünf Bücher vom Festungsbauen*, Frankfurt am Main: Erasmus Kempfer 1621. 2. italienische Ausgabe mit einem 6. Buch: Buonaiuto Lorini, *Le Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Nvovamente ristampate, Corrette & Ampliate di tutto quello che mancaua per la lor compita perfettione, con l'aggivnta del sesto libro:* ..., Venetia: Francesco Rampazetto 1609. Buonaiuto Lorini, *Sechs Bücher vom Festungsbauen*, Frankfurt am Main: Fietzer 1638 dürfte eine Übersetzung dieser Ausgabe sein. Das 6. Buch ist in deutscher Übersetzung separat gedruckt worden: Buonaiuto Lorini, *Das sechste Buch vom Festungsbauen*, Oppenheim: Hieronimus Galler 1616.

5 Zu Palmanova cf. Horst de la Croix, "Palmanova: A study in sixteenth century urbanism", in: *Saggi e Memorie di storia dell'arte* 5 (1966), S. 27–41. Giulio Savorgnano war seit 1567 *Sopraintendente Generale* der venezianischen Festungen und Artillerie und ist 1587 in diesem Amt bestätigt worden (John Rigby Hale, *Renaissance war studies*, London: Hambledon Press 1983, S. 168).

6 Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 175 und 178. – Die beiden Texte sind 1629 von Daniel Mögling in die deutsche Sprache übertragen worden: Mögling, Mechanische Kunstkammer, op. cit. (wie Anm. 1). Mögling hat für seine Übertragung Guidobaldo del Monte, *Mechanicorum liber*, Pesaro: Hieronimus Concordia 1577 und Guidobaldo del Monte, *Le mechaniche. Tradotte in volgare dal sig. Filippo Pigafetta*, Venedig: Francesco di Franceschi 1581 benutzt und als "Zugab" die postum erschienene Paraphrase der *Mechanica Problemata* von Bernardino Baldi angehängt: Bernardino Baldi, *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes. Adiecta succincta narratione de autoris vita & scriptis*, Mainz: Witwe von Johann Albin 1621. – Zur Übersetzung von Pigafetta und zum Verhältnis von Guidobaldo zu Savorgnano cf. Mary Henninger-Voss, "Working Machines and Noble Mechanics. Guidobaldo del Monte and the Translation of Knowledge", in: *Isis* 91 (2000), Heft 2, S. 233–259.

7 Mögling, Mechanische Kunstkammer, op. cit. (wie Anm. 1), S. 42.

8 Guidobaldo del Monte, Le mechaniche, op. cit. (wie Anm. 6).

9 Id., a2b.

10 Cf. Alexander G. Keller, "Mathematicians, mechanics and experimental machines in Northern Italy in the sixteenth century", in: Maurice Crosland (Hg.), *The emergence of science in Western Europe*, London: Macmillan 1975, S. 15–34.

11 Cf. Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 175–176; Lorini, Delle Fortificationi Libri cinque, 1597, op. cit. (wie Anm. 4), S. 172.

12 Guidobaldo del Monte, Le mechaniche, op. cit. (wie Anm. 6), Fol. 63v–64r.

13 Cf. Adriano Carugo, "Gli obelischi e le macchine nel rinascimento", in: id. (Hg.), Domenico Fontana, *Della trasportatione dell'obelisco vaticano 1590*, Mailand: Ed. Il Polifilo 1978, S. XXI–LX.

14 Domenico Fontana, *Della Trasportatione dell'obelisco vaticano et delle fabriche di nostro signore Papa Sisto ·V·* ..., Libro primo, In Roma Appresso Domenico Basa. 1590, Fol. 8r (B2a) (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 2220 fol., http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-117).

15 Neben der *Cosmografia*, dem 1606 veröffentlichten *Compasso geometrico et militare* und den beiden, dem Traktat von Lorini ähnlichen fortifikatorischen Schriften *Le fortificazioni* und *Breve instruzione all'architettura militare* ist *Le mecaniche* Teil jener Privatlektionen gewesen, die Galileo in Padua zum Gelderwerb erteilt hat. Cf. Mary Josephine Voss, *Between the cannon and the book. Mathematicians and military culture in sixteenth-century Italy. A dissertation submitted to the Johns Hopkins University*, Baltimore (Maryland) 1995, S. 309f. Cf. dazu jetzt auch Matteo Valleriani, *Galileo Engineer* (= Boston studies in the philosophy of science, vol. 269), Dordrecht: Springer 2010, besonders S. 71–113.

16 Galileo Galilei, *Les mécaniques. Avec plusieurs addition rares et nouvelles utiles aux architectes, ingenieurs, fonteniers philosophes et artisans. Traduites de l'Italien par L. P. M. M*, Paris: Henry Guenon 1634.

17 M. Stillman Drake, "Galileo Gleanings. V. The Earliest Version of Galileo's *Mechanics*", in: *Osiris* 13 (1958), S. 266.

18 Savorgnano hat Lorini im Hause von Contarini kennengelernt, und Pinelli war der direkte Vorgesetzte von Pigafetta. Cf. Voss, Between the cannon and the book, op. cit. (wie Anm. 15), S. 315.

19 Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 176. "Possanza, è quella facoltà, che dà principio al moto, che può esser la forza d'vno, ò più huomini, quero animali.", in: id., Le Fortificationi, 1609, op. cit. (wie Anm. 4), S. 172.

20 Drake, Galileo Gleanings. V., op. cit. (wie Anm. 17), S. 270–271.

21 Guidobaldi gibt in Proposition IV zum Hebel das Gesetz der Wege am Hebel richtig an, ergänzt es aber durch folgendes Korollar: "Daher erscheint/ daß das spatium der mouirenden Potentz/ gegen dem spatio der bewegten Last/ ein grössere Proportion hat; als gedachte Last gegen der Potentz oder Macht selbsten." (Mögling, Mechanische Kunstkammer, op. cit. [wie Anm. 1], S. 79).

22 Drake, Galileo Gleanings. V., op. cit. (wie Anm. 17), S. 272–273; Galileo Galilei, *Le mecaniche. Edizione critica e saggio introduttivo di Romano Gatto*, Florenz: Leo S. Olschki Editore 2002, S. 53, Zeile 303 und 305.

23 Galilei, Le mecaniche, op. cit. (wie Anm. 22), S. 53, Zeilen 307–310.

24 Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 175; id., Le Fortificationi, 1609, op. cit. (wie Anm. 4), S. 196.

25 Id., Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 175; id., Le Fortificationi, 1609, op. cit. (wie Anm. 4), S. 197.

26 Guidobaldo wendet die von Galilei übernommene Methode, den Flaschenzug auf den Hebel zu reduzieren, zum ersten Mal an (Israel Edward Drabkin/M. Stillman Drake, *Mechanics in Sixteenth-Century Italy*, Madison/Milwaukee/London: University of Wisconsin Press 1969, S. 47 und 307).

27 Mögling, Mechanische Kunstkammer, op. cit. (wie Anm. 1), S. 113.

28 Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 183; "... alla forza, che è bastante a sostentare il peso, ogni minima giunta che se gli faccia, bastarà per effettuare il moto, & alzare esso peso", in: id., Le Fortificationi, 1609, op. cit. (wie Anm. 4), S. 205.

29 Am Beispiel des Hebels erläutert Lorini, dass, wenn die bewegende Kraft am kürzeren Hebelarm angreift, die Geschwindigkeit eines Körpers am längeren Hebelarm durch die Macht vergrössert

werden kann ("si può augume[n]tare la velocità con la potenza", in: Lorini, Le Fortificationi, 1609, op. cit. [wie Anm. 4], S. 239).

30 Id., S. 186f.

31 Galilei, Le mecaniche, op. cit. (wie Anm. 22), S. 68, Zeilen 893–896.

32 Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 187. Weil die Schraube mit anderen Maschinen kombiniert ist, gibt die Regel ein Verhältnis für eine konkrete Maschine an. Cf. Theodor Beck, *Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues*, Berlin 1900, S. 244.

33 Galilei, Le mecaniche, op. cit. (wie Anm. 22), S. 45, Zeile 13.

34 "Allora solamente si potrà dire, essersi superato il naturale instituto, quando la minor forza trasferisse la maggiore resistenza con pari velocità di moto, secondo il quale essa camina; il che assolutamente affermiamo essere impossibile a farsi con qual si voglia machina, immaginata o che immaginar si possa.", in: id., S. 46, Zeilen 50–54.

35 Id., S. 46, Zeilen 62–66. Mersenne hat diese Erkenntnis 1634 so zusammengefasst: "En effet il est impossible de gaigner la force, & le te[m]ps tout ense[m]ble", in: Galilei, Les mécaniques, op. cit. (wie Anm. 16), Widmung von Mersenne ("A MONSIEVR MONSIEVR DE REFFVGE, CONSEILLER DV Roy au Parlement.").

36 Galilei, Le mecaniche, op. cit. (wie Anm. 22), S. 45f., Zeilen 27–34.

37 Id., S. 47f., Zeilen 98–122.

38 Die beste aller Antriebsarten ist jene, durch die "am meisten/ der Macht die Stärcke/ vnd dem Last die Geschwindigkeit vermehret werden kan" ("che più si potrà accrescere forza alla possanza, e velocità al peso"), in: Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 208 (Lorini, Le Fortificationi, 1609, op. cit. [wie Anm. 4], S. 211).

39 Am Beispiel des Hebels erläutert Lorini, dass, wenn die bewegende Kraft am kürzeren Hebelarm angreift, die Geschwindigkeit eines Körpers am längeren Hebelarm durch die Macht vergrössert werden kann ("si può augume[n]tare la velocità con la potenza", in: Lorini, Le Fortificationi, 1609, op. cit. [wie Anm. 4], S. 239).

40 Id., Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 208–209. Der Unterschied entspricht der bis in das 19. Jahrhundert geläufigen Unterscheidung von 'toter' und 'lebendiger' Kraft des Wassers.

41 Id., Le Fortificationi, 1609, op. cit. (wie Anm. 4), S. 238.

42 Id., Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 209.

43 Id., Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 196; id., Le Fortificationi, 1609, op. cit. (wie Anm. 4), S. 224.

44 Id., Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 207.

45 Id., S. 196.

46 Id., S. 206.

47 Id., S. 202ff.; cf. Beck, Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues, op. cit. (wie Anm. 32), S. 249ff.

48 Lorini, Fünf Bücher vom Festungsbauen, 1607, op. cit. (wie Anm. 4), S. 207.

49 Galilei, Le mecaniche, op. cit. (wie Anm. 22), S. 46, Zeilen 62–66.

50 Was in der Arbeit des Handwerkers "Mechanischem Gebiet vnderworffen ist", kann mit der "Kunst", meint Guidobaldo, "gewaltsamlich" oder sogar "wider der Natur Gesatz" verrichtet werden, in: Mögling, Mechanische Kunstkammer, op. cit. (wie Anm. 1), S. 42.