

Zeitschrift:	Scholion : Bulletin
Herausgeber:	Stiftung Bibliothek Werner Oechslin
Band:	7 (2012)
Artikel:	'Mechanische Operation' und 'mathematische Demonstration' : Bounaiuto Lorini, Galileo Galilei und die Analogie von Maschinen- und Festungsbau
Autor:	Büchi, Tobias
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-719969

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

‘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



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 gruità 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 grösse Maschine.³

In der Theorie der Festungsbaukunst ist eine Auseinandersetzung mit solchen Sachverhalten nicht in den Festungsbautraktaten von Galileo, sondern im 1596 in Venedig erschienenen 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

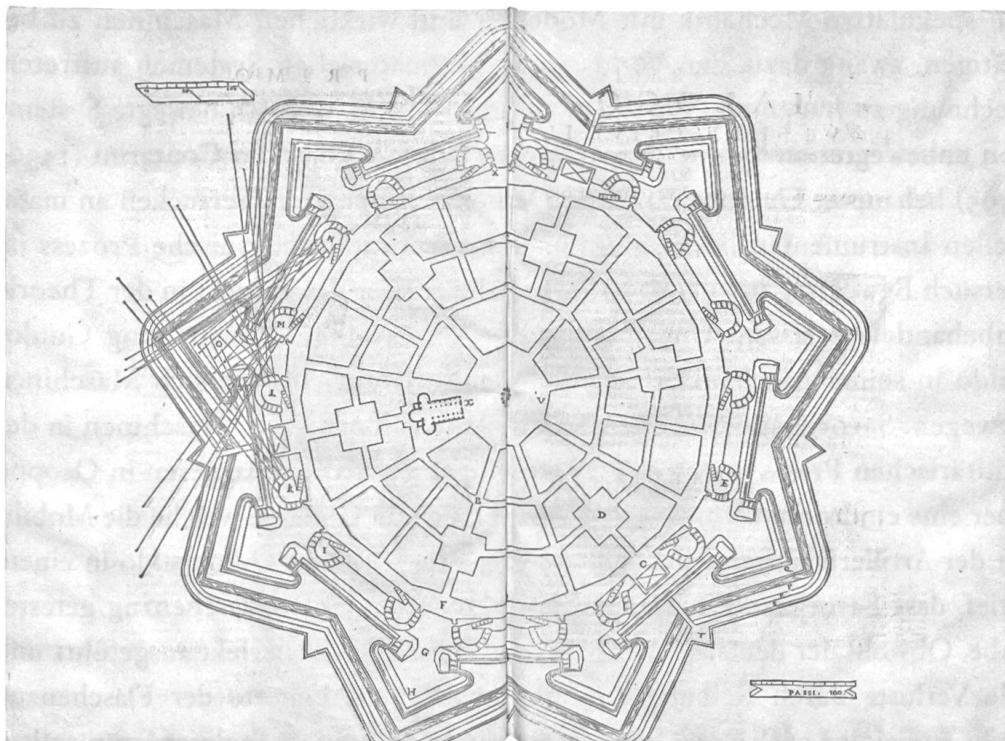


Abb. 2: Kritischer Plan von Palmanova, in: Buonaiuto Lorini, *Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' quali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti ..., Nvovamente dati in luce., In 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 vermittele, 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 geäusserzt 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

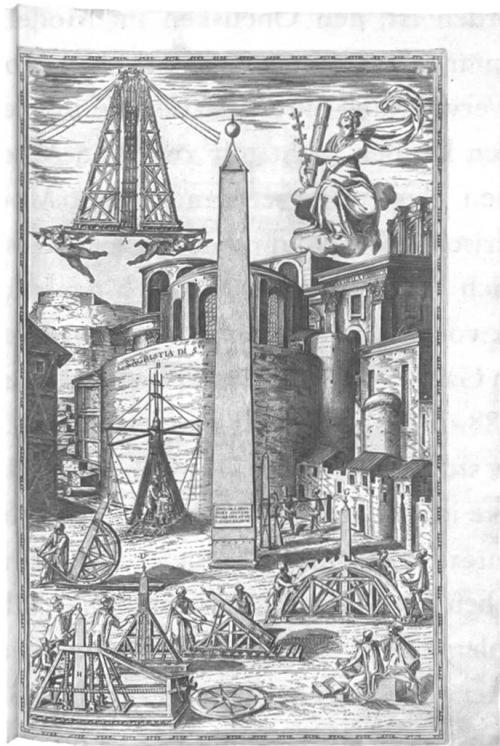


Abb. 3: Wettbewerbsmodelle, in: Domenico Fontana, *Della Trasportatione dell'obelisco vaticano et delle fabrice di nostro signore Papa Sisto .V. ...*, Libro primo, In Roma Appresso Domenico Basa. 1590, Fol. 8r (B2a) (Zürich, ETH-Bibliothek, Alte Drucke, Rar 2220 fol., <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-117>)

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 Obelisen 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.

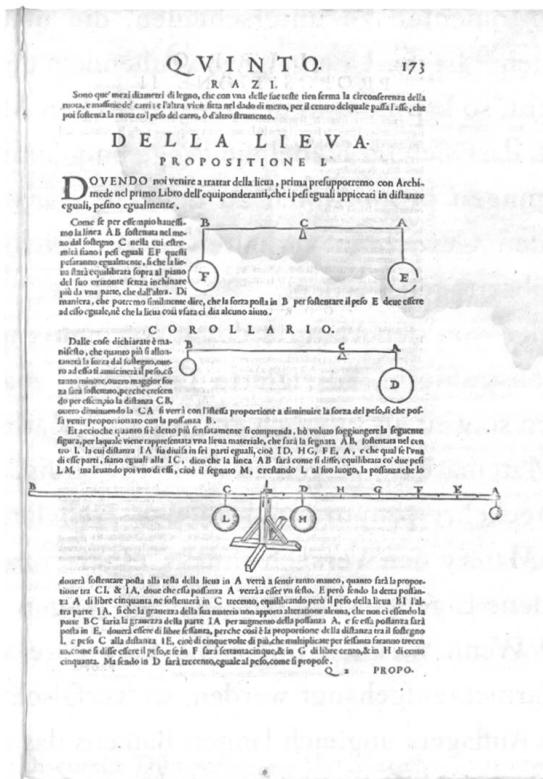


Abb. 4: Abstrakter und materieller Hebel, in: Buonaiuto Lorini, *Delle Fortificationi di Bvonaivt Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque*. Ne' quali si mostra con le più facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti ..., Novamente dati in luce., 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.



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 eines 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 prendere, 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 waagerechtem 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

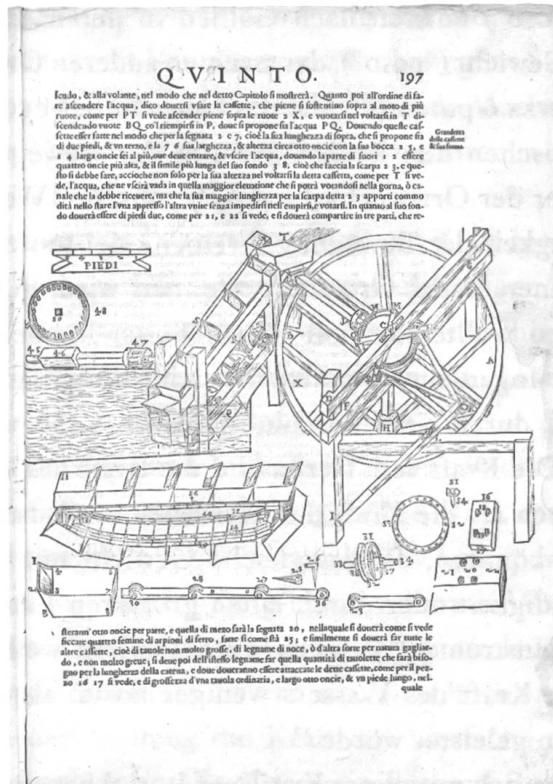


Abb. 6: Eimerwerk mit Schwungrad, in: Buonaiuto Lorini, *Delle Fortificationi di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque*. Ne' quali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti ..., Nvovamente dati in luce., In Venetia, 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

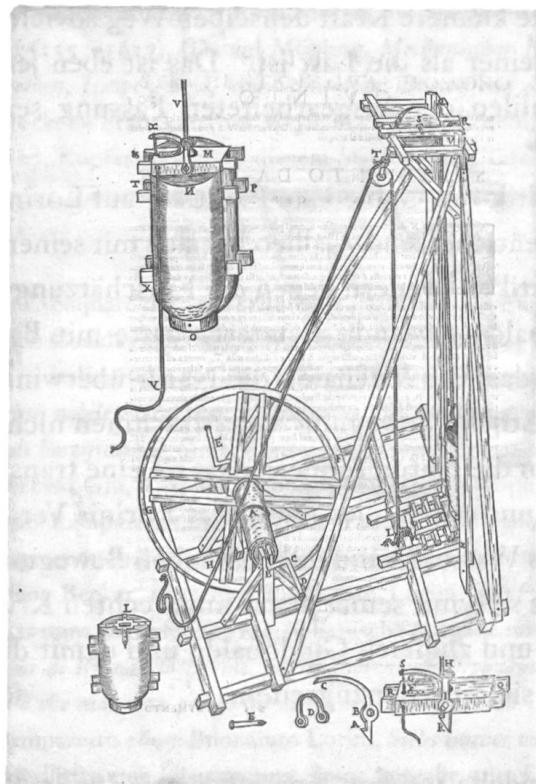


Abb. 7: Ramme mit Schwungrad, in: Buonaiuto Lorini, *Delle Fortificationi di Bvonaiavto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' quali si mostra con le piv facili regole la scienza con la pratica, di Fortificare le Città, & altri luoghi sopra diuersi siti ..., Nvovamente dati in luce., In Venetia, 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 annäherte.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 Fortificazioni di Bvonaivto Lorini, nobile Fiorentino, Libri cinque. Ne' quali 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 Henniger-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 fabricle 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, ingénieurs, 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 grösvere 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.