

## Kapitel 4

### Fokus: Architektur und Mechanik

Antonio Becchi

#### 4.1 Zerbrechliche Teleskope

Im späten 16. und frühen 17. Jahrhundert thematisieren Manuskripte und Druckschriften die Fragen und Widersprüche, welche die Auseinandersetzung über das Verhältnis von Mechanik und Architektur bis in das 20. Jahrhundert prägen sollten.<sup>1</sup> Neue Wissensbestände formierten sich und innerhalb weniger Jahre vollzog sich ein Perspektivwechsel, durch den Werke plötzlich als überholt erscheinen, die kurz zuvor noch als wegweisend galten. Der Abstand, der die erste lateinische (und die zweite italienische) Edition des Kommentars von Daniele Barbaro<sup>2</sup> zu Vitruvs *De architectura*<sup>3</sup> von der *Idea dell'architettura universale* Vincenzo Scamozzis (1615) trennt ist ebenso deutlich wie der zwischen dem *Mechanicorum liber* Guidobaldo del Montes (1577) und den von Galilei während und im Anschluss an seine Zeit in Padua verfassten Werken. Für viele Aspekte ist das Verhältnis zwischen dem Vorher und Nachher klar und offensichtlich, hinsichtlich anderer sind bestimmte Begriffe und Abbildungen Indizien für den raschen Wandel der Denkhorizonte.

Der Unterschied zwischen beiden Wissensfeldern ist dennoch bemerkenswert: Während für die Architektur das Werk Scamozzis als letztes der großen Renaissance-Unternehmungen gelten kann, markieren demgegenüber die Werke Galileis, trotz enger Bezüge zur vorangegangenen Literatur, einen Neubeginn. Man könnte sagen, dass im architektonisch-konstruktiven Bereich noch kein Instrument wie das „galileische“ Teleskop erschienen war und dass sich diese Ungleichzeitigkeit gerade mit Blick auf die Materialität der Teleskope bestätigte. Denn sobald Teleskope größere Dimensionen annahmen, stellte sich das zentrale und dringendste Problem gar nicht im optisch-astronomischen Bereich, sondern im mechanisch-strukturellen. Mit großem Getöse und schmerzlichen Enttäuschungen verbundene Unglücke blieben nicht aus.<sup>4</sup> Die unsichere Statik des langen, weitgehend frei schwebenden Rohres stellte die Fähigkeiten der zeitgenössischen Handwerker auf eine harte Probe. Der Bau entsprechender Gestelle erforderte Wagemut und Fachwissen (Festigkeit der Materialien, Analyse der Belastungsverhältnisse, etc.), das noch nicht zur Verfügung stand, so dass sich die Risiken schwer begrenzen ließen. Genau diese Kompetenzen sollten einige Jahrzehnte später mit der zunehmenden Erforschung der *resistentia*

---

<sup>1</sup>Dieser Beitrag ist z. T. folgenden Aufsätzen des Autors entnommen: Becchi 2008a, Becchi 2009, Becchi 2013a.

<sup>2</sup>Die erste Ausgabe des Kommentars von Barbaro erschien 1556.

<sup>3</sup>Barbaro 1567a; Barbaro 1567b.

<sup>4</sup>Eines der längsten Teleskope, das in Danzig nach einem Entwurf von Hevelius errichtet wurde, maß 45 Meter. Eine Abbildung findet sich in dem Werk Johannes Hevelius (1673, Abb. AA und BB). Vgl zu diesem und anderen Aspekten der Geschichte des Fernrohres Strano 2008. In diesem Band wird, in dem von Jim und Rhoda Morris verantworteten Abschnitt mit dem Titel *Riprodurre il telescopio di Galileo* (S. 58–61), der Aufbau des (auf etwa 1610 datierten) Teleskopes beschrieben, das Galilei Cosimo II zum Geschenk gemacht hatte.

*solidorum* (Festigkeit der festen Körper) und der Strukturmechanik den Unterschied im Verhältnis von Mechanik und Architektur ausmachen.

## 4.2 *Mechanica und machinatio*

In der Kontaktzone beider Disziplinen nimmt die oben genannte Beschleunigung so hinsichtlich der auf die Architektur angewandten Mechanik diffusere Züge an. In der gesamten zeitgenössischen Literatur sind die Schwierigkeiten offensichtlich, das architektonische Konstruieren in Begriffen der Mechanik zu erschließen. Schon einige Jahrzehnte zuvor hatten die Manuskripte Leonardo da Vincis, trotz ihrer Einzigartigkeit, die Zweifel des Architekten gezeigt, wie ein Schaden am Bauwerk, ein Nachgeben der Fundamente oder ein plötzlicher Einsturz zu interpretieren sei, oder auch wie sich die Festigkeit eines Balkens, einer Mauer oder eines Gewölbes bewerten lasse. Am Ende des 16. Jahrhunderts blieb diesbezüglich noch vieles zu klären, aber was aus theoretischer Perspektive unvollständig blieb, war auf der Ebene der Regeln der Handwerkskunst durchaus klar.

Auf der Basis eines kenntnisreichen *saper fare* (Wissens, wie etwas zu machen ist) entstanden tatsächlich einige der bemerkenswertesten, gerade in statisch-konstruktiver Hinsicht interessanten Bauwerke der Renaissance. Dazu gehört der (Wiederauf-)Bau der Ponte Santa Trinita in Florenz (1567–1570), die Rialtobrücke in Venedig (1588–1591), die Fleischbrücke in Nürnberg (1596–1598), oder auch die Errichtung der Kuppel des Petersdoms in Rom (vollendet 1589). Hier handelte es sich um Bauvorhaben, die mit langen Debatten, gelehrten Diskussionen und Überlegungen verbunden waren. Bei solchen Projekten waren „mechanische“ Fragestellungen notwendigerweise von besonderer Relevanz – zugleich erforderten sie jedoch verlässliche, konkrete und auf den Einzelfall zugeschnittene operative Lösungen. Genau dies suchte beispielsweise Giovanni Antonio Rusconi anlässlich der Gutachten für den (im Dezember 1577 teilweise durch ein Feuer zerstörten) Dogenpalast in Venedig anzubieten, an denen sich unter anderem Andrea Palladio beteiligte, der 1570 die *Quattro libri dell'architettura* veröffentlicht hatte. Rusconi, der in diesen Jahren einen Architekturtraktat vorbereitete, der posthum nur in Teilen erschien,<sup>5</sup> begründete seine Überlegungen zur Mechanik auf einem bekannten Denkmodell, indem er den Dogenpalast mit einer ungleicharmigen Waage (*stadera*) gleichsetzte. Sein Gutachten basiert eindeutig auf den Bezügen zur Mechanik, mit deren Hilfe die Stabilität der Mauern und der beim Brand beschädigten Dachgeschosse evaluiert werden (was möglicherweise zu seiner Zeit alles andere als ungewöhnlich war, auch wenn entsprechende Schriftquellen in dieser Hinsicht wenig auskunftsfreudig sind). In der am 1. Februar 1578 beendigten Schrift bekräftigt Rusconi:

„Was also das Abrutschen von besagter Mauer angeht, ist dies meines Erachtens unmöglich, wenn man das Beispiel der ungleicharmigen Waage heranzieht [...] wenn wir in diesem Beispiel den Palazzo mit der ungleicharmigen Waage gleichsetzen, erkennen wir in ihm dieselben Elemente, die wir bei ihr benannt haben, als da wären folgende: Gehen wir zunächst davon aus, dass der Haken an der Stelle des Balkones des Versammlungssaales des gran Consiglio anzusetzen wäre [...].“<sup>6</sup>

<sup>5</sup>Rusconi 1590.

<sup>6</sup>„Quanto poi il slamar il detto muro, dico similmente essere impossibile, prendendo essempro dalla stadera [...] con questo esempio se somigliaremo il Palazzo alla stadera, troveremo in lui le medesime parti, che habbiamo no-

Die Biografie des „ingegnero“ Rusconi,<sup>7</sup> eines Schülers von Niccolò Tartaglia, der mit Girolamo Cardano in Kontakt stand<sup>8</sup> und sorgfältig Vitruv studiert hatte, repräsentiert beispielhaft Fermente eines im Entstehen begriffenen Wissens. War dies lückenhaft bezüglich des mathematischen Handwerkszeugs und der Interpretation in Begriffen der *resistentia solidorum*, so war es dennoch mit Blick auf die Schärfung der in der konstruktiven Praxis angewandten Regeln weit fortgeschritten.

Andere Autoren, denen man wertvolle Schriften zur Architektur verdankt, bieten keine weitergehenden Hinweise – ihre Überlegungen zu Stabilität und Festigkeit gehen üblicherweise nicht über das Stadium einfacher Andeutungen hinaus. Wo dies der Fall ist, wie bei den von Scamozzi beschriebenen Kuppeln und der von ihm vorgeschlagenen Analogie zur Festigkeit eines Eies,<sup>9</sup> gehen die Hinweise nicht über solche viel versprechende Verweise hinaus. Diese sind durchaus nützlich, um auf ein Untersuchungsfeld und einzelne Referenzpunkte als Denkanstöße hinzuweisen, reichen aber nicht aus, um eine glückliche Idee in eine abgeschlossene mechanische Erörterung zu überführen.

Zu diesem historischen Problem gesellt sich ein historiografisches. Die Quellen, die es erlauben würden, einen überzeugenden Bezug zwischen mechanischen Kenntnissen und architektonischen Konstruktionen herzustellen, sind größtenteils noch nicht hinreichend untersucht, in vielen Fällen vielleicht sogar erst noch zu entdecken bzw. wiederzuentdecken. Gelten für die spätere Zeit die *Discorsi e dimostrazioni matematiche* (1638) Galileis als Meilenstein, ist alles andere als klar, wo die Markierungen früherer Wendepunkte auf dem Weg dorthin zu verorten wären. Aus diesem Grund hat sich die moderne Forschung lange und gern bei den Erfahrungen Galileis in seiner Zeit in Padua und, insbesondere, den mit dem Arsenal in Venedig verbundenen Aktivitäten aufgehalten (der Besichtigung im berühmten incipit der *Discorsi e dimostrazioni matematiche*). Ähnliches Interesse hat, wiederum mit Blick auf Galilei, ein Beitrag aus dem Frühstadium seiner Karriere gefunden, der Text der beiden an der Florentiner Akademie gehaltenen Vorlesungen „zu Gestalt, Ort und Größe der Hölle Dantes“ („circa la figura, sito e grandezza dell’Inferno di Dante“, 1587–1588). Diese Schrift hat eine ganz erstaunliche historiografische Begeisterung ausgelöst, die gut zu dem scheinbaren Fehlen von anderen Quellen zu diesem Thema passt.<sup>10</sup>

Tatsächlich jedoch sagt die Abhandlung über die Gestalt der Hölle vergleichsweise wenig über die *resistentia solidorum* und die Strukturmechanik aus. Was Galileo dazu schreibt, geht nicht über das zu seiner Zeit weit verbreitete Wissen hinaus. Dies bestätigen die beiden

---

minato in lei, et saranno tali. Diremo prima che l’oncino sarà in quello luogo del terrazzo del gran Consiglio [...].“ Zorzi 1956–1957, 168. Zorzi erläutert das hier verwendete Wort ‚slamar‘ in einer Anmerkung: „Im venezianischen Dialekt bedeutet ‚slamar‘ ‚gleiten, rutschen‘.“, vgl. Zorzi 1956–1957, 168, Anm. 8.

<sup>7</sup>Zu Rusconi vgl. Piasentin 1978–1979 und Bedon 1983; auch Bedon 1996, IX–XXII.

<sup>8</sup>Vgl. Tartaglia 1546, Buch IX, Frage XXXVIII, 126v. Diese Aufgabe entspricht einem Brief an Girolamo Cardano vom 4. August 1539. Rusconi wird auch in anderen Passagen von Tartaglias Werk zitiert.

<sup>9</sup>Vgl. Scamozzi 1615, Teil II, Buch VIII, 320: „Diese Kraft und Ebenmäßigkeit des kuppelförmigen Gewölbes können wir auch durch Erfahrungen mit natürlichen Objekten kennenlernen, insbesondere mit dem Ei; dieses hat aufgrund seiner Natur eine sehr dünne und verletzbare Schale, dennoch ist es der Kraft des Menschen nicht möglich, sie zu zerbrechen, wie schon Plinius bemerkte [...] wir haben ausprobiert, dass drei auf einen Tisch gestellte Eier, oben und unten mit etwas Wachs versehen, das Gewicht eines metallenen Mörsers von mehr als 150 libre halten.“.

<sup>10</sup>Vgl. *Due lezioni all’Accademia Fiorentina circa la figura, sito e grandezza dell’Inferno di Dante* in: Galilei 1968, Bd. IX, 31–46 und 47–57. Die beiden Vorlesungen sind leicht online zugänglich, beispielsweise über die Seite [www.liberaliber.it](http://www.liberaliber.it). Vgl. für kritische Untersuchungen Settle 2001; 2002; Lévy-Leblond 2006 und Peterson 2002. Petersons Text ist online verfügbar über: [www.mtholyoke.edu/courses/mpeterso/galileo/scaling8.pdf](http://www.mtholyoke.edu/courses/mpeterso/galileo/scaling8.pdf).

Auszüge aus der zweiten Vorlesung, die am eindeutigsten das Verhältnis von Mechanik und Architektur betreffen:

„Aber lassen wir die Architektur beiseite und schauen wir, ob diese Konstruktion stabil bleibt, wobei wir meines Erachtens feststellen werden, dass dies nicht der Fall sein kann. Denn angenommen, dass der Höllenschlund mit gleich weit voneinander entfernten Rändern aufsteigt, so ruhen die oberen Partien nicht auf einem haltenden Fundament und werden daher zweifellos einbrechen. Denn da schwere Körper beim Fallen eine Strecke beschreiben, welche sie direkt zum Erdmittelpunkt führt, brechen sie ein und fallen, sofern sie auf dieser Strecke nicht auf etwas stoßen, das sie aufhält und stützt, [...]. Wenn über diesem Nichts die anderen Steine konvergieren und sich stützen, dürfen sich die Mauern, welche sie tragen müssen, nicht außerhalb der senkrechten Linie befinden, die zum Erdmittelpunkt führt. Dieser Nachteil wird in Manettis Architektur nicht erwähnt.“<sup>11</sup>

Im Folgenden widmet sich Galilei dem Problem der großen Überwölbung des Höllentrichters, der in seinem Zentrum Jerusalem trägt:

„Hier könnte man uns entgeghalten, dass man nicht einmal die Hölle für so groß halten darf wie es bei Manetti der Fall ist. Denn, wie Einige vermutet haben, scheint es unmöglich, dass das Deckengewölbe der Hölle halten könne ohne einzustürzen und in ebendieser Hölle zu versinken, wenn es so dünn wäre wie es sein müsste, wenn sich die Hölle derart hoch erstreckt. Es wäre nicht dicker als der achte Teil des Erdradius, also etwa 405 Meilen, und es käme hinzu, dass man davon noch den Platz für die Grotte der Unglückseligen wie auch für die erhebliche Distanz zwischen Meeresoberfläche und Meeresboden abziehen müsse. Dem kann man leicht antworten, dass diese Dicke voll und ganz ausreicht; denn nimmt man ein baugleiches kleines Gewölbe mit einem Bogen von 30 Ellen, bleiben etwa vier Ellen für seine Dicke. Das ist mehr als genügend, denn selbst wenn man für seine Dicke bei einem Bogen von 30 Ellen nur eine einzige Elle (anstelle von viere) vorsieht, vielleicht auch nur eine halbe, wird auch das ausreichend stabil sein. Da wir nun wissen, dass die Meere wenige Meilen, ja sogar weniger als eine einzige Meile tief sind, wenn wir den erfahrensten Seeleuten Glauben schenken, können wir die Zahl der Meilen bestimmen, die uns für die Grotte der Unglückseligen erforderlich scheinen, da uns der Dichter kein genaues Maß angegeben hat. Wenn wir nun noch annehmen, dass zwischen dieser und dem Meeresboden 100 Meilen liegen, wird das Gewölbe nichtsdestotrotz sehr dick bleiben und sogar dicker sein als es nötig wäre, um zu halten.“<sup>12</sup>

<sup>11</sup> „Ma lasciamo stare l'architettura, e veggiamo se tal fabbrica può reggersi, che, al parer mio, troveremo non potere; perché, ponendo esso che il burrato si alzi su con le sponde equidistanti tra di loro, si troveranno le parti superiori prive di sostegno che le regga, il che essendo, indubitatamente rovineranno: perciò che, essendo che le cose gravi, cadendo, vanno per una linea che dirittamente al centro le conduce, se in essa linea non trovano chi le impedisca e sostenga, rovinano e caggiono (...). Se dunque sopra questa buca puntano e si sostengono le altre rocce, è necessario che le mura che le deono sostenere non siano fuori del perpendicolo che tende al centro. Questo inconveniente non è nell'architettura del Manetti.“, Galilei 1968, Bd. IX, 52–53.

<sup>12</sup> „Qui ci potrebbe essere opposto che né l'Inferno si deve credere esser così grande come il Manetti lo pone; essendo che, sì come alcuni hanno sospettato, non par possibile che la volta che l'Inferno ricuopre, rimanendo sì

Einige Forscher haben diesen Seiten des Frühwerks besondere Bedeutung zuzuschreiben gesucht.<sup>13</sup> Doch der Verdienst von Galileis Reflexionen in den *Lezioni* liegt vor allem darin, den unbestimmten und unklaren Charakter der auf die Architektur angewandten Mechanik zu betonen. Die „konstruktionsrelevanten“ Stichworte reagieren nur auf bestimmte, mit früheren Kommentaren verbundene Einsprüche („Denn, wie Einige vermutet haben“, *essendo che, sì come alcuni hanno sospettato*). Neben Antonio Manetti und Alessandro Vellutello, auf die Galilei auf expliziten Wunsch der Akademie einging, hatten schon viele andere über die Architektur der Hölle geschrieben. Zum Beispiel hatte Pierfrancesco Giambullari (1551), ebenfalls an die Florentiner Akademie gewandt, einige Überlegungen zu diesem Thema präsentiert; 1568 war das Buch *Dante con l'esposizione di M. Bernardino Daniello da Lucca* mit einer sehr eindrücklichen Darstellung der Hölle erschienen.<sup>14</sup>

So sind die Bemerkungen Galileis kaum mehr als ein gutes Indiz für „Grundauffassungen“ dieser Zeit: für die Mauern vertraut er der Senkrechten, für die Gewölbe, über durchaus riskante strukturelle Ähnlichkeiten hinaus, einfachen Überlegungen zum Verhältnis zwischen der Spannweite und der Mauerstärke in Höhe des Schlusssteines. In den reiferen Werken sollten diese Themen mit recht anderen Schwerpunktsetzungen und Entwicklungslinien wieder auftauchen. Dabei ging es in der Tat darum, nicht in die Falle allzu einfacher Analogien und einleuchtender „Proportionalitätsgesetze“ zu tappen – womit man das Risiko von Missverständnissen einging. Dieses Unverständnis erfuhr Galilei beim Briefwechsel mit Antoine de Ville. Bezüglich der Themen, die in den *Discorsi e dimostrazioni matematiche* angegangen werden sollten (insbesondere das Problem, ob „Maschinen, die als Modell gelten, dies auch im Maßstab 1:1 tun“<sup>15</sup>) schrieb er:

„[...] ich muss zugeben, dass es mir nicht gelungen ist, meinen Ansatz mit der Deutlichkeit zu erläutern, die erforderlich ist, um sich gut zu verständlich zu machen, insbesondere wenn man Vorschläge vertritt, die nicht den allgemeinen Auffassungen entsprechen. Ich muss daher feststellen, dass meine Intention eine ganz andere, dem Verständnis von Euer Wohlgeboren sogar völlig entgegen gesetzte war.“<sup>16</sup>

---

sottile quant'è di necessità se l'Inferno tanto si alza, si possa reggere, e non precipiti e profondi in esso Inferno; e massime, oltre al rimanere non più grossa dell'ottava parte del semidiametro, che sono miglia 405 incirca, essendovi ancora da levarne per lo spazio della grotta degli sciagurati, ed essendoci molte gran profondità di mari. Al che facilmente si risponde, che tal grossezza è sufficientissima: perciò che, presa una volta piccola, fabricata con quella ragione, se arà di arco 30 braccia, gli rimarranno per la grossezza braccia 4 in circa, la quale non solo è bastante, ma quando a 30 braccia di arco se gli desse un sol braccio, e forse  $\frac{1}{2}$ , non che 4, basteria a sostenersi; onde, sapendo noi che pochissime miglia, anzi che meno di un sol miglio, si profundano i mari, se creder doviamo a i più periti marinari, e potendo assegnare quante miglia ci pare per la grotta de gli sciagurati, non essendogli data dal Poeta determinata misura, quando ancora ponessimo tra questa e la profondità de i mari importare 100 miglia, nulla di meno rimarrà detta volta grossissima, e più assai che non è necessario per sostenersi.“, Galilei 1968, Bd. IX, 54–55.

<sup>13</sup>Peterson (2002, 2) schreibt nachdrücklich: „Ich werde zeigen, dass der Schlüssel zu Vielem, was in den ‚Zwei neuen Wissenschaften‘ sonderbar klingt, in zwei weitgehend unbeachteten frühen Vorlesungen liegt, die Galilei zu Gestalt, Ort und Größe von Dantes Inferno gegeben hat.“ („I will show that the key to much of what is strange in *Two New Sciences* is to be found in two rather neglected early lectures given by Galilei on the shape, location, and size of Dante's Inferno.“) Text online verfügbar: [www.mtholyoke.edu](http://www.mtholyoke.edu).

<sup>14</sup>Daniello 1568, vgl. Giambullari 1544; 1551. Vgl. zu diesen Themen und der entsprechenden Ikonographie Engel 2006 und Malke 2000.

<sup>15</sup>„le macchine che riescono in piccolo, riusciranno anche in grande“.

<sup>16</sup>„[...] conviene che io confessi di non aver saputo spiegare il mio concetto con quella evidenza che è necessaria per ben dichiararsi, e massime quando si arrecano proposizioni remote dalle opinioni comuni. Dico per tanto che l'intenzione mia fu molto diversa, anzi del tutto contraria al senso che V.S. ne ha cavato.“, G. Galilei, Brief an

Schon vorher hatten andere Autoren zu diesem Thema vereinzelt Anregungen angeboten, die den Weg zu einer Lösung hätten erleichtern können, jedoch erst im frühen 17. Jahrhundert gebündelt werden und Früchte tragen sollten. Klassische Bezugspunkte, die eine Untersuchung lohnten und sich als entscheidend für die moderne Formulierung von Problemen der Strukturmechanik erweisen sollten, waren die im Verlauf der Renaissance intensiv studierten und kommentierten Werke von fünf Autoren: Aristoteles, Euklid, Archimedes, Heron von Alexandria und Pappus. Genau diese Gruppe illustrierter Klassiker stand in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts auch im Zentrum des Interesses der von Federico Commandino begründeten „Schule von Urbino“.

Von diesen Autoren und ihren Werken gingen auch die Untersuchungen Guidobaldo del Montes für das im Jahr des Brandes des Dogenpalastes von Venedig erschienene *Mechanicorum liber* aus.<sup>17</sup> Doch Rusconi musste sich nicht auf diesen Text beziehen, um die ungleicharmige Waage als interpretatorischen Zugang für sein Gutachten zur Stabilität des Palastes zu nutzen: Die Waage und ihre Qualitäten in der Baupraxis waren wohlbekannt, in der maßgeblichen Fachliteratur beschrieben und illustriert – insbesondere den verschiedenen Neubearbeitungen des zehnten, der *machinatio* gewidmeten Buches von Vitruvs *De Architectura*. In der Folge jedoch sollte das Werk Guidobaldos dank der von Filippo Pigafetta in engem Kontakt mit dem Autor besorgten italienischen Übersetzung<sup>18</sup> von vielen Anderen mit großem Interesse gelesen werden. Pigafetta hatte das Potenzial des neuen Zugangs zu mechanischen Problemen (nicht nur zu Maschinen im engeren Sinn) erfasst – was die Architektur betraf, bot der Transport des Vatikanischen Obelisken (1585–1586), einige Jahre nach seiner Übersetzerarbeit, eine glänzende Bestätigung für diesen Schritt.

Die berühmte, von Domenico Fontana bewerkstelligte *trasportatione* kann durchaus als Paradigma für die zeitgenössische technisch-wissenschaftliche Debatte um das Verhältnis von Maschine und Architektur gelten. Viele verfolgten das Großereignis, spätestens seit Beginn des von Papst Sixtus V. initiierten Ideenwettbewerbes, dem der *Trattato di Camillo Agrippa Milanese di trasportar la guglia in su la piazza di San Pietro*<sup>19</sup> vorausging. Sehr viele eilten nach Rom, um die für das Aufrichten des Obelisken genutzte *gran macchina* zu sehen und die fünfhundert Tage dauernde Umsetzung zu verfolgen. Die von Fontana selbst besorgte Publikation im Folioformat (D. Fontana 1590) verschaffte dem spektakulären Unternehmen schließlich unvergänglichen Ruhm. Auch Pigafetta befand sich zu dieser Zeit in Rom, ebenso wie Vincenzo Scamozzi im Gefolge einer (von Marc'Antonio Barbaro angeführten) venezianischen Delegation, die den Auftrag hatte, dem neuen Papst Sixtus V. die Ehre zu erweisen. Es ist kein Zufall, dass Aufzeichnungen zum Transport im Zentrum einer 1586 erschienenen Schrift stehen, in der Pigafetta versuchte (unter Zitierung zahlreicher älterer Quellen), ‚historische‘ Klarheit über die Schriften derer zu gewinnen, die „flegelhaft“ handeln, „da sie die mechanischen Wissenschaften nicht verstehen“. Bereits in seiner Übersetzung des *Mechanicorum liber* Guidobaldos hatte er die Taten desjenigen herausgehoben,

---

Antoine de Ville, Arcetri, März 1635, vgl. Galilei 1968, Bd. XVI, 196. Fulgenzio Micanzio beschreibt die Persönlichkeit von Antoine de Ville in einem Brief an Galileo vom 24. Februar 1635, Galilei 1968, Bd. XVI, 177–178: „Dies ist ein französischer Edelmann, Ingenieur und, soweit ich beurteilen kann, sehr gebildet nicht nur in den mechanischen, sondern in allen mathematischen Wissenschaften und kenntnisreich bezüglich der guten Autoren, aber, wie diejenigen, die es wissen, unerfahren.“

<sup>17</sup>Vgl. Renn und Damerow 2010, Renn und Damerow 2012, Becchi 2011 und Becchi, Bertoloni Meli und Gamba 2013.

<sup>18</sup>del Monte 1581.

<sup>19</sup>Agrippa 1583.

„der mit scharfem Verstand ausgestattet ist, die erwähnten Wissenschaften von Kindesbeinen an erlernt hat und zeichnen sowie mit seinen Händen arbeiten kann“ – natürlich um die Figur des Künstler-Ingenieurs zu preisen, der „als wahrhaftiger und herausragender Mechaniker, Erfinder und Vollender wunderbarer Werke reüssieren könne“.<sup>20</sup>

Dieser kurze Discorso ist an den Grafen von Belgrad, Giulio Savorgnan, adressiert. Dieser hatte darum gebeten, über den Gang der Arbeiten und die Details der Ausführung auf dem Laufenden gehalten zu werden. In dem „Labor“ des Schlosses von Osoppo hatte Savorgnan, ein angesehener Militäringenieur der Venezianischen Republik, der sich nach der Schlacht von Lepanto ins Privatleben zurückgezogen hatte, eine spezielle *Wunderkammer* bzw.:

„ein Magazin von Militärmaschinen und solchen zum Bewegen von Lasten eingerichtet, von denen er etwa ein Dutzend verschiedene eigenhändig hergestellt hatte, teils zum Ziehen, teils zum Heben außergewöhnlicher Lasten mit äußerst geringer Kraft.“<sup>21</sup>

Ein „Speicher“ (*magazino*) besonderer Art, der auch „Treffpunkt verdienter Personen und Heimstatt von Soldaten und Gelehrten“<sup>22</sup> war: ganz im Einklang mit der Idee eines *stanza dell'architettura militare* (der Festungsarchitektur gewidmeten Kabinetts), mit der sich Pigafetta<sup>23</sup> an Ferdinando I, Großherzog der Toskana wenden sollte und das letztlich zum Vorspiel der Einrichtung des *stanzino delle matematiche* (mathematischen Kabinetts) in den Uffizien wurde (dessen erste Dekorationen durch Giulio Parigi auf die Jahre 1599–1600 zurückgehen). Das Interesse für mechanische Vorrichtungen und die Militärarchitektur hatte den Grafen von Belgrad dazu gebracht, mit Guidobaldo und vielen anderen zeitgenössischen Gelehrten zu korrespondieren. Er war es im Übrigen gewesen, der Pigafetta ersucht hatte, eine italienische Version des *Liber mechanicorum* anzufertigen, wie Pigafetta selbst zu Beginn seiner Übersetzung anmerkte. Savorgnan stand, wie auch der bereits erwähnte Rusconi, in Kontakt mit Tartaglia, dem er zahlreiche mechanische Fragen vorgelegt hatte.<sup>24</sup> Unter den weiteren Bekanntschaften sind Vincenzo Pinelli, der in engem Kontakt mit der Gruppe in Urbino stand, und Paolo Sarpi hervorzuheben. Sarpi wurde, zeitgleich mit der Erfüllung seiner Aufgaben als *Procuratore generale* des Ordens der Serviten (1585–1588),

<sup>20</sup>Pigafetta, Brief an Giulio Savorgnan in del Monte 1581, Blatt a2v.

<sup>21</sup>„un magazzino di machine bellicose, et da mover pesi, havendone ella fabricate di sua industria forse dodici di maniere differenti, parte da strascinare, et parte da alzare con pochissima forza smisurati pesi.“, Pigafetta in: del Monte 1581, Blatt bv–b2r.

<sup>22</sup>„un ridotto di persone virtuose, et un albergo di soldati, et di dottori“., Pigafetta in del Monte 1581, Blatt bv.

<sup>23</sup>Vgl. Prinz 1983. Auf S. 351–353 ist die Transkription der *Informazione* Pigafettas abgedruckt, die folgendermaßen endet: „Und wenn er zu verstehen geben wird, über diese Erfindungen zu verfügen, sowohl Instrumente, als auch militärische Modelle, wird man in kurzer Zeit den gesamten Saal voller auserwählter Dinge vorfinden, und er wird sogar Zugbrücken, Bootsbrücken, ponti d'odri und unterschiedliche aus Fässern gefertigte Brücken erhalten, sowie freschi und Brustwehren, die jedem Kanonenschlag widerstehen, und sichere, rollbare Schutzschilder und Artillerie, die aus vorgefertigten Elementen zusammengesetzt ist, und sogar ohne Verwendung von Metall wirksam ist, und ähnliches [...]“.

<sup>24</sup>Archivio di Stato di Venezia, *Secreta, Materie miste notabili*, reg. 13, Blätter 55v–56: „Aufgaben 29 Aufgaben, die Giulio Savorgnan 1542 durch seinen zergewüchsigten Knaben dem berühmten Nicolò Tartaglia stellen ließ, um ihn über unterhaltsame Dinge nachdenken zu lassen“; vgl. auch den Ausstellungskatalog *Ambiente scientifico veneziano tra cinque e seicento, Testimonianze d'archivio* (27. Juli–6. Oktober 1985), Venezia, Tip. Helvetia 1985, 35 und die Abhandlung von Adriano Carugo „Gli obelischi e le macchine nel Rinascimento“, in: D. Fontana 1979, LVII–LVIII, insbesondere Anm. 87.

von Sixtus V. nach Rom gerufen, um seine Auffassung zum Transport des Vatikanischen Obeliskens darzulegen.

Im Umfeld des Transportes des Vatikanischen Obeliskens sind demnach einige der herausragenden Köpfe dieser Zeit zu erkennen. Der Ort des Geschehens, wenige Jahre vor der Baustelle der Kuppel des Petersdomes und unweit von dieser eingerichtet, war scheinbar ein ideales Experimentierfeld für diejenigen, die sich mit den Prinzipien der neuen Wissenschaft der Mechanik befassten. Auf der von Domenico Fontana geleiteten Baustelle waren 900 Personen beschäftigt. Mit einer der Praxis stets eigenen Dringlichkeit rückte sie mechanisch-konstruktive Probleme ins Zentrum der Aufmerksamkeit, die später zu jeweils einzelnen Kapiteln moderner Ingenieurtraktate werden sollten. Überlegungen zur Reibung, zur Stabilität der tragenden Elemente, zur Bestimmung von Volumina, des spezifischen Gewichtes oder der Festigkeit (von Balken, Eisenstangen oder Seilen), standen auf der Tagesordnung solcher Bauvorhaben ebenso wie auf denen der Studierstuben der Mechanik. Das Motto „beim Bauen werden wir zum Baumeister“ (*fabricando fabri fimus*) galt als Aufruf zum *fare*, aber auch als spezielle Erinnerung an die starren Regeln des *saper fare*, die wenig Spielraum für Irrtümer ließen, wie Fontana nur allzu gut wusste. Der Transport des Obeliskens war bereits von Papst Paul III. an Michelangelo herangetragen worden, doch der große Künstler hatte die Einladung klugerweise ausgeschlagen, in dem er zurückfragte: „Und wenn er zerbricht?“<sup>25</sup>

Die als Bezugspunkt herangezogenen antiken Quellen entstammten der Welt der Mechanik und der Architektur, wie das von Vitruv im neunten Buch von *De architectura* beschriebene Beispiel der goldenen Krone Hierons zeigt. Auf dieser berühmten Episode mit dem Protagonisten Archimedes gründete die Debatte um mögliche Methoden, mit denen das spezifische Gewicht eines Materials zu bestimmen war.<sup>26</sup> Sämtliche zeitgenössische Autoren bezogen sich, häufig in polemischer Weise, auf diesen Text. Stand dieses Thema durch seine offensichtlichen praktischen Implikationen ebenfalls im Zentrum der Debatte um die *trasportazione della guglia*, finden sich entsprechende Spuren zudem in den Schriften Sarpis und Guidobaldos, oder auch in Galileos Jugendwerk *La bilancetta*, das ebenfalls in den Jahren des Obeliskens abgefasst wurde.

### 4.3 Über die *Mechanischen Probleme* hinaus

Wie schon erwähnt gilt traditionell das Erscheinungsdatum der *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) von Galileo Galilei als Beginn der Studien zur Festigkeitslehre und Strukturmechanik. Nach dieser Lesart verschaffte Galileis Schrift einem bis dahin unbearbeiteten Untersuchungsgebiet offizielle Anerkennung. Als Vorläufer gelten demnach nur vereinzelte theoretische Überlegungen Leonardo da Vincis zum mechanischen Verhalten von Balken, Bogen- und Gewölbekonstruktionen (um 1500) sowie auf empirischer Basis gewonnene geometrische Regeln zur Bestimmung der Mauerstärke bzw. des Steinschnitts für Gewölbekonstruktionen.

Diese Interpretation beruht auf einem problematischen Verständnis der Geschichte der Baustatik, das einzelne Protagonisten der Renaissance wie Leonardo hervorhebt und Galileo unhinterfragt zum Stammvater der modernen Wissenschaft erklärt. Das Bild, das sich auf der Basis der überlieferten Quellen rekonstruieren lässt, ist jedoch weit vielschichtiger, insbesondere wenn es auch das Bauwerk selbst miteinbezieht.

<sup>25</sup> „E se si rompesse?“, vgl. Mercati 1589, 291.

<sup>26</sup>Becchi 2013c.



Das statische Wissen der Baumeister der mittelalterlichen Kathedralen ist so im Detail ebenso unbekannt wie die Kenntnisse, auf deren Basis Filippo Brunelleschi die einzigartige Kuppel von S. Maria del Fiore in Florenz entwarf. Dennoch ist die Frage des Verhältnisses von Mechanik und Architektur bereits vor den *Discorsi* Galileis vielfach angerissen worden. Schon Heron von Alexandria versuchte in seiner *Mechanik*,<sup>27</sup> das Problem eines Balkens, der auf mehreren Trägern ruht, zu erklären und verwies dabei auf ein ähnliches Vorgehen bei Archimedes in dessen Traktat *Buch der Stützen*. Von solchen antiken Schriften, zu denen auch die *Mechanischen Probleme* gehören,<sup>28</sup> reicht eine Traditionslinie zur mittelalterlichen *scientia de ponderibus* und der Mechanik der Renaissance, die vielfach das Verhältnis von Mechanik und Architektur berührt.

Das 16. Jahrhundert interpretierte den Baukörper häufig als in seiner Stabilität bedrohte „Maschine“. Damit wurde an theoretische Überlegungen der griechischen Mechanik angeknüpft, ein weiterer obligatorischer Bezugspunkt war das Buch X der *De Architectura* von Vitruv, das auf der Baustelle eingesetzte Maschinen vom einfachen Hebel bis hin zu großen Kränen behandelte. Die Integration der bedeutenden Tradition des Maschinenbaus in die Architektur erscheint demnach als Voraussetzung dafür, dass die Renaissance Teile eines Gebäudes als Elemente eines „mechanisch“ definierten Körpers interpretieren konnte, der letztendlich eine Anordnung miteinander verbundener Hebel darstellt. Diese Lesart führte nicht zuletzt eine ältere anatomische Analogie Leon Battista Albertis in *De re aedificatoria* (1485) weiter, ein Werk, das für gut zweihundert Jahre zum unverzichtbaren konzeptionellen Bezugspunkt für mechanische Überlegungen zu Bogenkonstruktionen und Gewölbebau wurde. Alberti hatte hier die strukturellen Teile des Bauwerkes zu bestimmen gesucht, die jeweils die Funktion von Knochen, Sehnen und Muskeln repräsentieren.

Dieselben Themen beschäftigten Bernardino Baldi, Autor der *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes* (1621; 2010). Die zwischen 1582 und 1615 entstandenen und postum publizierten *Exercitationes*, einer der zahlreichen Kommentare zu den *Mechanischen Problemen*, boten eine kohärente Erläuterung von Problemen der Baustatik und zeigen ein starkes Interesse für Forschungen an der Grenze zwischen Mechanik und Architektur. Baldi, der lange Zeit am Hof von Guastalla lebte, wo er zum Abt ernannt wurde, ist eine der bekanntesten Persönlichkeiten aus dem Kreise der in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts in Urbino ausgebildeten Wissenschaftler.<sup>29</sup> In den Kreisen um Federico Commandino in Urbino konnte niemand von den oben genannten Themen unberührt bleiben, selbst wenn er sie nicht detailliert bearbeitet hatte: sei es durch das verbreitete Interesse an den Werken der genannten Autoren, sei es durch die spezifischen Verbindungen zur Welt des Bauens. Im Hause Commandino war die Architektur dank des Vaters präsent, der mit den neuen Festungsanlagen der Stadt Urbino befasst war, während Guidobaldo del Monte sich auf Anreiz von Freunden und Mitbürgern wiederholt für ähnliche Themen interessiert hatte<sup>30</sup>: Einige

<sup>27</sup>Nix und Schmidt 1900.

<sup>28</sup>Aristoteles 1936, eine lange Aristoteles zugeschriebene Schrift.

<sup>29</sup>Baldi war wegen seines besonderen Sprachtalents bekannt und soll mindestens zwölf Sprachen beherrscht haben. Diese außerordentlichen Fertigkeiten erwarb er in seiner Jugend, als er unter der Leitung von Giovanni Antonio Turoneo in Urbino studierte. Darüber hinaus hat das Zusammentreffen mit Giovanni Battista Raimondi, Initiator der *Tipografia Medicea Orientale* (Rom), eine wichtige Rolle gespielt: Von ihm lernte er Arabisch, was eine Vertiefung seiner akribischen Arbeit an den wissenschaftlichen und literarischen Quellen ermöglichte.

<sup>30</sup>Zu den Aktivitäten Guidobaldos auf dem Gebiet der Architektur vgl. Calegari 2004.

in den *Meditatiunculae de rebus mathematicis* (1592.)<sup>31</sup> versammelten Skizzen zeigen ein mehr als oberflächliches Interesse an der Architektur und konstruktionsrelevanten Themen, das mit seinen Interessen an mechanischen Fragen verbunden war.

Baldi ging aber weiter. Die *Exercitationes*, die schon mit dem Frontispiz die enge Verwandtschaft mit der Paraphrase anzeigen, die Guidobaldo den *Duos Archimedis aequponderantium libros* (1588) gewidmet hatte, fügen sich perfekt in das Vorhaben einer systematischen Auslotung der antiken Mathematik und Mechanik ein, die von der Schule Commandinos angeregt wurde. Über die *Mechanischen Probleme* hinaus widmete sich Baldi vielen weiteren ‚Klassikern‘, von den *Automata* Herons von Alexandria bis zu den *Mathematischen Sammlungen* von Pappus (1588), während sein Interesse für Euklid und Archimedes Teil der Arbeit war, die unter seinen Augen von Commandino und Guidobaldo vorangetrieben wurde.<sup>32</sup> Auch wenn seine Reflexion Teil dieses Forschungsprogramms war, zu dem Baldi seit frühester Jugend beigetragen hatte, nahm sie schließlich charakteristische Züge von großer Originalität an. Als exzessiver Leser und talentierter Mehrsprachler war dem jüngsten der drei Autoren aus Urbino ein Leben bestimmt, das weniger von den Mauern des Territoriums geprägt war (im Gegensatz zu Guidobaldo sollte Baldi lange Zeit fern des Herzogtums verbringen), als insbesondere von weniger disziplinar eingegrenzten Studien. Als Vielschreiber aus Berufung und Notwendigkeit (vornehmlich aus der Erfordernis, eine gut dotierte Anstellung zu finden), aber sicherlich auch aus eigener Entscheidung und aus Vergnügen, befand sich Baldi in einer idealen Position, eine Interpretation ‚mechanischen‘ Wissens zu liefern, welche die durch Guidobaldos *Liber mechanicorum* (1577) definierten Grenzen erweiterte und zum Teil durchbrach, auch wenn dieses noch gar nicht lange auf dem Markt war.

Während Guidobaldo sein *Liber mechanicorum* auf die einfachen Maschinen gründete und sich damit dem Einfluss von Heron und Pappus unterwarf, folgte Baldi, der den Werken dieser Autoren umfassende Studien gewidmet hatte, mit seinen mechanischen Überlegungen der wenig zielgerichteten Struktur der *Mechanischen Probleme* der aristotelischen Schule. Der Originalvorlage zu folgen bot ihm die Möglichkeit, eine größere Bandbreite von Themen in Angriff zu nehmen und jene zu vertiefen, die Guidobaldo beiseite gelassen hatte. Baldi wagte sich also als einziger der Gruppe in Urbino an die Komplexität des pseudo-aristotelischen Textes und veröffentlichte ihn inklusive seiner Kommentare (bekanntlich beschäftigte sich auch Guidobaldo ausführlich in den *Meditatiunculae* damit, seine Reflexionen gehen jedoch nicht über einfache Anmerkungen hinaus). Baldi nahm damit die ambitionierte Herausforderung an, die aus der heterogenen, sprunghaften und verstreuten Anlage der Themen in den *Mechanischen Problemen* resultierte. Guidobaldo hingegen vereinfachte der Ordnung halber und versuchte gewissermaßen, unter den Problemstellungen „aufzuräumen“: daraus resultierte eine Ordnung, die notwendigerweise ausschließend, zuweilen tautologisch ist, während die Unordnung dezidiert ausgreifend bleibt und zuweilen gerade als solche zur Klärung beiträgt.

Die minutiöse Auseinandersetzung mit den 35 *Problemen* (die Baldi Aristoteles zuschreibt, obwohl man bereits damals an ihrer Authentizität zweifelte) führte den Abt von Guastalla auf neue Wege, auf denen das Zusammentreffen von Architektur und Mechanik nicht nur als mögliche Option, sondern als dringliche hermeneutische Notwendigkeit erschien. Aus dieser Perspektive repräsentieren die *Probleme* am deutlichsten die Heraus-

<sup>31</sup> Zu diesem Manuskript vgl. Tassora 2001, frei verfügbar über die Homepage von ECHO <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/mpiwglib/pesaro/#tassora>.

<sup>32</sup> Für ein Verzeichnis der zahlreichen Druckwerke und Manuskripte Baldis vgl. Serrai 2002.

forderung, der sich weder Rusconi, noch Guidobaldo, noch Galileo Ende des 16. bzw. zu Beginn des 17. Jahrhunderts zu stellen gewagt hatten.

Baldi befasste sich mit der ganzen Spannweite der *Mechanischen Probleme*, ohne bei einer ersten Lektüre stehen zu bleiben, zu der bereits umfassende Literatur vorlag. Ihm ging es nicht nur darum, ihre Aussagen zu wiederholen, um sich dann bezüglich der Antworten und Erklärungen als Anhänger von Aristoteles oder Archimedes (oder von beiden) zu bekennen, so wie es an einem bestimmten Punkt selbst die aufmerksamsten Kommentatoren unternahmen. Ihm ging es vielmehr darum, die gewohnten Lektüren aus den Angeln zu heben, um über Selbstverständlichkeiten hinaus zu kommen. Hinter der Barriere des Gewohnten erblickte Baldi das architektonische Konstruieren, was zweifellos durch sein theoretisches wie praktisches Interesse für diese Materie bedingt war. Was Verpflichtungen auf dem Gebiet der Architektur angeht, die mit einer großen Leidenschaft für das Zeichnen verbunden waren, sind Nachweise seines Wirkens aus Urbino, Pesaro, Guastalla und Rom überliefert.<sup>33</sup> In Guastalla hatte ihn beispielsweise Don Ferrante (Fürst von Molfetta und Signore von Guastalla) beauftragt, sich mit den Bauprojekten des Hofes zu befassen und ihn über das Fortschreiten der Arbeiten zu informieren. Bei den Briefen, die Baldi an den außerhalb der Stadt verweilenden Fürsten schrieb, handelt es sich um richtiggehende Baustellenberichte. Das Interesse für technische Aspekte des Bauens war jedoch nicht nur der Pflichterfüllung gegenüber dem Signore geschuldet. Baldi brachte sich schließlich, in Übereinstimmung und mit Unterstützung von Don Ferrante, als Konstrukteur der „ponte al Baccanello“ ins Gespräch:

„Monsig.r, der Abt von Guastalla hat mich wissen lassen, dass er, wenn man nun die Ponte del Baccanello erneuern muss, einen wunderschönen Entwurf für eine Brücke hat, den er gerne umsetzen würde, und er wünscht von Euer Wohlgebornen gehört zu werden und wenn er mit Ihnen gesprochen haben wird, oder Ihnen schriftlich das Nötige mitgeteilt hat, wird er Ihnen das Modell davon zeigen.“<sup>34</sup>

In theoretisch-literarischer Hinsicht bezeugen zwei Hauptwerke Baldis seine Leidenschaft für die Architektur. Sie waren zur Zeit ihrer Veröffentlichung sehr geschätzt und galten auch in den folgenden Jahrhunderten als wegweisend: *De verborum Vitruvianorum significatione*<sup>35</sup> und die *Descrizione del Palazzo Ducale di Urbino*.<sup>36</sup> Das erste ist theoretisch-philologischer Natur und lässt die großartige Sprachkompetenz des Autors erkennen. Diesbezüglich schreibt der Biograph Fabrizio Scarlone:

„Als Adriano Romano aus Polen zurückkehrte, wo er einem Mitglied des Hofes Vitruv erläutern hatte, sagte er manchmal, dass er, wenn er in Polen den Kom-

<sup>33</sup>Vgl. Serrai 2002, 23–24; Anm. 24.

<sup>34</sup>„Monsig.r Abate di Guastalla mi ha fatto sapere che dovendosi rifare ora il Ponte del Baccanello ha una bellissima invenzione di Ponte che volentieri metteria in opra, e desidera esser sentito da V.S. alla quale parlato ch'avrà, o in scritto fattole sapere quello che passa, farai poi anco vedere il modello.“, Brief von Don Ferrante Gonzaga an den Marchese Cornelio Bentivoglio, datiert 1. Mai 1602; vgl. Campori 1855, 29. Don Ferrante erwähnt einen Brief Baldis vom 22. April 1602: „Ich habe an S.r Donesmondi geschrieben, dass er Ihrer Exzellenz etwas von der am Baccanello zu bauenden Brücke erzählt; wenn Sie Gelegenheit haben, an den S.r Marchese zu schreiben, könnten Sie ihm darüber einige Worte mitteilen.“, vgl. Ronchini 1873, 133–134.

<sup>35</sup>Baldi 1612a, ein umfassendes *Wörterbuch* für die Lektüre Vitruvs; vgl. auch Baldi 1612b.

<sup>36</sup>B. Baldi, *Descrizione del Palazzo Ducale d'Urbino*, in: Baldi 1724; vgl. auch Baldi 1590. Zu diesem Text vgl. Bernini 2002.

mentar Baldi zur Verfügung gehabt hätte, er diesen sozusagen um seinen Lohn gebracht hätte, weil er selbst seine Aufgabe dann völlig mühelos hätte erledigen können.“<sup>37</sup>

Das zweite ist ein Meisterwerk der Beschreibungskunst, wie Giovan Mario Crescimbeni bemerkt hatte:

„[...] und obgleich er sich damals weit von dieser Stadt entfernt befand, verfasste er es nichtsdestotrotz mit der Hilfe sowohl des Planes, den er selbst vorher verfertigt hatte, als auch seiner wunderbaren Erinnerungskraft, mit solcher Genauigkeit, wie er es gemacht hätte, wenn er sich in Urbino befunden hätte: eine Fähigkeit, die in der Profession des Architekten als sehr nützlich gilt, denn da die Örtlichkeit dieses Palastes recht schwierig ist, gelingt es nur mit Mühe, aus dem einfachen Plan seine innere Schönheit zu erkennen.“<sup>38</sup>

Die technischen Charakteristika dieses Palast-Universums werden von den Fundamenten bis zu den Dächern peinlich genau beschrieben. Dabei wird auf die Eigenschaften der Materialien eingegangen, auf die geistreichen konzeptionellen Lösungen und auf die Einsichten, mittels derer es gelungen war, „eine so große Maschine“ (*una macchina così grande*) prachtvoll und harmonisch zu gestalten, indem *materia e forma* gekonnt vereint wurden.<sup>39</sup> Im Kommentar zum sechzehnten der *Mechanischen Probleme* widmet sich Baldi diesen Aspekten und lobt eine konstruktive Lösung, die er Luciano Laurana zuschreibt: die zur Aufnahme des Gewölbeschubs verwendeten Zuganker im Gewölberücken zu verstecken, um so die geometrische Reinheit des darunterliegenden Raumes nicht anzutasten.<sup>40</sup>

Das Studium von Texten zur Mechanik und Texten zur Architektur verlief also bei Baldi entlang zweier paralleler Denklinien, die schließlich in ein gemeinsames Forschungsfeld mündeten. Vor diesem Hintergrund ist leicht zu verstehen, warum zwei der *Mechanischen Probleme*, das Vierzehnte und das Sechzehnte, für Baldi zu einer fundamentalen intellektuellen Provokation wurden. Im Vierzehnten wird gefragt:

„Warumb under 2 Hölzern gleicher grösse ans Knie gehalten / dasjenige leichter zerbrochen werde / so mit beyden Händen zu allereusserst als das so nahe bey dem Knie gefasset worden: Und wiederumb so man mit dem Fuß auff ein Holz tritt / nachmalen dasselb an beiden eussersten enden erwischt und kräftiglich beuget / solchs eher und leichter entzwey gehe / als wann mans gar nahe bey dem Fuß gefasset und angedähnet hette?“<sup>41</sup>

<sup>37</sup>Scarloncino, „scio dixisse aliquando Adrianum Romanum e Polonia reuersum, vbi Vitruuium Palatino cuidam explicauerat, si commentarium Baldi in Polonia adhibere potuissem, aurum quod mecum attuli emunxissem, quia satis fecissem muneri labore nullo.“, *De vita et scriptis Bernardini Baldi*, cit., Seiten nicht paginiert.

<sup>38</sup>„[...] ed ancorché si trovasse allora lontano di quella città, nondimeno coll'aiuto e della pianta, che egli stesso aveva dapprima cavata, e della sua maravigliosa memoria, la fece con tale esattezza, quale fatta l'avrebbe se si fusse ritrovato in Urbino: fatica riputata utilissima nella professione dell'architettura, imperciocché per essere assai difficile il sito, ove quel palagio è fabbricato, molto riesce malagevole il poter riconoscersi dalla semplice pianta la sua intera bellezza.“, Crescimbeni 2001, 73.

<sup>39</sup>Baldi 1724, 69.

<sup>40</sup>Vgl. Baldi 1621, 110.

<sup>41</sup>Deutsche Übersetzung von Mögling 1629; vgl. Baldi 1621, 91: „Cur eiusdem magnitudinis lignum facilius genu frangatur si quispiam aequè diductis manibus extrema comprehendens fregerit, quam si iuxta genu. Et si terrae applicans pede superposito manu hinc inde diducta confregerit quam prope.“

Im Sechzehnten ist die Frage tückischer:

„Woher es komme / daß je länger die Hölzzer / je schwächer sie werden / und sich im aufheben biegen; Ein kleines (zum Exempel 2 Elen langes) doch dünn und schwanckes / eben so wol / als ein dick grob und starckes so 100 Elen lang?“<sup>42</sup>

Baldi ist klar, dass es hier um die Bruchfestigkeit geht; klassische Reflexionen zum Gleichgewicht reichen nicht mehr aus, um das Phänomen zu erklären und in seinem Kern zu beschreiben. Mit Bezug auf das Hebel-Waage-Modell ist es nicht nur erforderlich, Gewichte, Distanzen und ihr wechselseitiges Verhältnis in Rechnung zu stellen, sondern auch das Verhalten der Materialien. Nicht alles lässt sich auf die einfachen Maschinen und die von ihnen verkörperten Regeln zurückführen.

Die Überlegung Baldis geht von der Annahme aus, dass der Hebel, der mit dem Balken gleichzusetzen ist, nicht der klassische gerade Hebel sein kann (wie es Aristoteles' Text und zahlreiche Renaissance-Kommentatoren nahe legen), sondern dass es sich um einen geknickten Hebel handeln muss, der die Dicke des Balkens berücksichtigt – so wie es 17 Jahre später in den *Discorsi* Galileis erläutert werden sollte. Nur mit diesem Denkmodell ist es möglich, einen Schritt über reine Überlegungen zum statischen Gleichgewicht hinaus zu machen (einfache Grundgleichungen der Statik, würde man heute sagen) und die Funktion der Zustandsgleichungen zu errahnen, das heißt derjenigen Gleichungen, die das Material der tragenden Elemente berücksichtigen.

Man darf nicht vergessen, dass dieser Perspektivwechsel für die im Entstehen begriffene ‚rational mechanics‘ ein dauerhaftes Ärgernis darstellen wird. Pierre-Simon Girard wird zwei Jahrhunderte später das Problem des in Relation zu Anwendungen des Hebelprinzips gesetzten starren Körpers im incipit des *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance* eindringlich verdeutlichen:

„Wenn es in der Theorie der Statik erlaubt ist, Hebel als Mittel zu sehen, durch die bewegte Körper aufeinander wirken als wären sie völlig starr, so ist diese Annahme bei der Anwendung dieser Wissenschaft auf die Berechnung von Maschinen nicht mehr anwendbar, denn die Natur hat keinen Stoff geschaffen, dessen Bestandteile nicht durch die Anwendung einer bestimmten Kraft voneinander getrennt werden könnten. Es gibt also zwei Arten von Gleichgewicht, die beim Hebel und den von ihm abgeleiteten Maschinen bedacht werden müssen: die eine besteht zwischen entgegengesetzten Kräften, die sich ausbalancieren, die andere zwischen einer bestimmten Funktion dieser Kräfte und dem Zusammenhalt der Teile, aus denen die Maschinen zusammengesetzt sind. Die Bedingungen der ersten Art kann man eindeutig bestimmen, die der zweiten jedoch nur annähernd.“<sup>43</sup>

<sup>42</sup>Deutsche Übersetzung von Mögling 1629; vgl. Baldi 1621, 95: „Quare, quo longiora sunt ligna, tanto imbecilliora fiant, si tolluntur, inflectuntur magis: tametsi quod breue est ceu bicubitum fuerit, tenue, quod uero cubitorum centum crassum?“

<sup>43</sup>„Si dans la théorie de la statique il est permis de regarder les leviers au moyen desquels les mobiles agissent les uns sur les autres comme doués d'une inflexibilité parfaite, cette supposition cesse d'être admissible dans l'application de cette science au calcul des machines, puisque la nature n'a créé aucune substance dont les parties intégrantes ne puissent être séparées les unes des autres par l'action d'un certain effort. Il y a donc deux espèce d'équilibre

In allgemeinerer Form handelt es sich um ein Problem, das die epistemische Differenz zwischen Grundgleichungen des Gleichgewichtes und Zustandsgleichungen verkörpert. Noch im 19. Jahrhundert hatte die Elastizitätstheorie als direkter Erbe dieser Überlegungen aufgrund genau dieser subtilen Unterschiede Schwierigkeiten sich durchzusetzen. Dies zeigt sich an den von Louis Poinso (einem berühmten Mitglied der *Académie des Sciences* in Paris und Dozent an der *École Polytechnique*) gegenüber ihren Gründervätern (vornehmlich Augustin-Louis Cauchy) vorgebrachten Einwänden bezüglich der *pressions obliques*. Daran erinnert beispielsweise Joseph Bertrand in einem biografischen Abriss dieses großen Gelehrten der Geometrie:

„Um die festen Körper mathematisch zu behandeln, ist es seiner Meinung nach notwendig, dass man akzeptiert, sie mathematisch zu definieren. ‚Mein Spazierstock‘, sagte er oft, ‚ist kein fester Körper. Er kann nicht nur brechen, sondern, was hundertmal schlimmer ist, er ist auch biegsam‘.“<sup>44</sup>

Die von Baldi vorgeschlagene konzeptionelle Abweichung ist von grundlegender Bedeutung und lag chronologisch noch vor den ersten beiden Tagen der *Discorsi e dimostrazioni matematiche* Galileis, die einer wie folgt definierten neuen Wissenschaft gewidmet sind: *Scienza nuova prima, intorno alla resistenza de i corpi solidi all'esser spezzati*. Die Fachtermini sind bei Baldi und Galileo identisch: mit der *condensatio* und *rarefatio* der Materie (*condensazione* und *rarefazione*, in der volkssprachlichen Version Galileis) lassen sich die Umstände erläutern, die bei Bruchphänomenen auftauchen.

Für Baldi wurde die eingehende Prüfung der in den *Mechanischen Problemen* gestellten Aufgabe zum Vorwand für eine weitere, unvorhersehbare Erweiterung. Von den zwanzig dem sechzehnten Problem gewidmeten Seiten<sup>45</sup> behandeln tatsächlich sechzehn die Architektur; die interpretative Wendung hin zur *costruzioni* wird mit folgenden Worten gerechtfertigt:

„Um nun aus diesem Studium – das ansonsten unnütz scheinen könnte – irgendeinen Nutzen zu ziehen, und damit unsere Argumente helfen, die Architekten vorsichtiger zu machen, werden wir passenderweise unsere Überlegungen auf die Architektur anwenden.“<sup>46</sup>

Unter dieser Prämisse geht Baldi von der Untersuchung des Balkens, die direkt mit dem Originaltext der *Mechanischen Probleme* in Zusammenhang steht, zu der der Säulen,

---

à considérer dans le levier, et dans les machines qui s'y rapportent; l'un existe entre les efforts opposés qui se contrebalancent, l'autre entre une certaine fonction de ces efforts et la cohérence des parties dont les machines sont composées. On peut assigner rigoureusement les conditions du premier, mais celles du second ne sont assignables que par approximation.“, Girard 1798, IX.

<sup>44</sup>„Pour traiter mathématiquement des corps solides, il fallait tout d'abord, suivant lui, qu'on voulût bien en accepter une définition mathématique. ‚Ma canne, disait-il souvent, n'est pas un corps solide; non-seulement elle peut rompre, mais elle plie, ce qui est cent fois pis‘.“, vgl. J. Bertrand „Notice sur Louis Poinso“ in: Poinso 1877, IX–XXVIII.

<sup>45</sup>Kein Kommentator hatte diesem Thema je mehr als zwei Seiten gewidmet, die ausführlichere Behandlung belegt das spezifische Interesse an diesem Thema. Vgl. zur langen Folge von Kommentaren und Übersetzungen der *Mechanischen Problemen* in der Renaissance Rose und Drake 1971; Lohr 1974; Lohr 1975–1982.

<sup>46</sup>„Modo vt ex hac contemplatione, quæ alias inutilis videtur, aliquam vtilitatem capiamus, ex his quæ contemplabimur, Architecti prudentiores fiant, ist hæc ipsa, de quibus agimus, ad rem ædificatoriam commode aptabimus.“, vgl. Baldi 1621, 98.

der Dachbinder, der Bögen und der Gewölbe über. Diese Abschweifung mag sich auf den ersten Blick als ungerechtfertigt und unpassend erweisen (denn keiner der vorangehenden Autoren hatte diese Themen in seinem Kommentar zu den Problemen berücksichtigt), Baldi jedoch musste dieser Schritt auf Basis seiner hervorragenden Kenntnis des architektonischen Schrifttums als selbstverständlich erscheinen. Es genügt, noch einmal den Traktat *De re aedificatoria* von Leon Battista Alberti in die Hand zu nehmen (mit dem Baldi wohl vertraut war und den er gern zitierte), um sowohl den Ursprung dieser auf den ersten Blick sonderbaren Abweichung, als auch Indizien dafür zu finden, was die Aufmerksamkeit von den starren Balken auf die Dachbinder verschoben hatte. Alberti schreibt:

„Ich glaube nämlich, daß die Menschen auf folgende Weise dazu geführt werden, einen Bogen zu spannen. Als sie sahen, daß man zwei Balken mit verbundenen Kopfenden unten mit auseinandergespreizten Füßen, so befestigen könne, daß sie in wechselseitiger Neigung und gleichem Gewichte gegeneinander stehenbleiben, gefiel ihnen diese Erfindung, und sie begannen auf diese Weise den Gebäuden zweitraufige Dächer aufzusetzen. Als sie hierauf, wie sie beabsichtigten, eine größere Fläche infolge der Kürze der Balken nicht überdecken konnten, setzten sie an den oberen Enden der Stämme ein Zwischenglied ein, so daß es fast die Form wie der griechische Buchstabe (Π) annahm. Diesen Zusatz nannten sie vielleicht Keil. Indem sie sodann dieses Verfahren fortsetzten, und durch Vervielfältigung der Keile auf diese Weise das Bild eines Bogens erblickten, gefiel ihnen dies und sie übertrugen diese Weise, einen Bogen zu bilden, auf das Steinmauerwerk und machten durch weiteres Hinzufügen von Keilen einen ganzen Bogen [...]“<sup>47</sup>

Die elegante historisch-genetische Rekonstruktion wird zu einem erhellenden Hinweis auf die Mechanik und konnte als solcher der Aufmerksamkeit des Abtes von Guastalla nicht entgehen. Ohne sich explizit auf Alberti zu beziehen ändert der Kommentar Baldis an diesem Punkt seine Richtung und erweitert das Untersuchungsfeld auf alle diejenigen Themen, die in den folgenden Jahren integraler Bestandteil der *science des ingénieurs* werden sollten.

Die Originalität der *Exercitationes* wirft die Frage auf, ob sich Quellen identifizieren lassen, auf die Baldi hätte zurückgreifen können. Pierre Duhem (1906; 1906–1913) ging davon aus, dass Baldi Ideen aufgenommen hat, die in den Manuskripten Leonardo da Vincis enthalten sind. Es ist nicht von vornherein auszuschließen, dass Baldi einige jener Manuskripte kannte. Vor allem, wenn man berücksichtigt, dass ein großer Teil von Leonardos *taccuini* am Ende des 16. Jahrhunderts in Mailand verfügbar war – eine Stadt, wo Baldi im Kreis von Kardinal Carlo Borromeo verkehrte. Duhems Hypothese lässt sich aber nicht beweisen. In der *Quaestio XVI* allerdings unterscheidet sich die Herangehensweise Baldis

<sup>47</sup>Vgl. für die deutsche Übersetzung Alberti 1912, 155. Vgl. Alberti 1485, Buch III. Zu der hier wiedergegebenen Transkription vgl. Alberti 1966, Bd. I; 234–135: „Et enim ducendi arcus rationem traxisse homines hinc puto: nam, cum viderent trabes duas iunctis capitibus posse imis pedibus divaricatis ita firmari, ut mutuo innexu paribusque contra se ponderibus sisterent, placuit inventum, et cooperunt istoc opere displuvia aedificiis tecta apponere. Post id, fortasse cum ex instituto maiorem cooperire aream trabium brevitate nequivissent, intermedium ad sublimia truncorum capita aliquid interposuere, ut essent prope atque apud Græcos littera Π, appositumque ipsum id fortassis cuneum appellavere. Succedente inde argumento multiplicatis cuneis istiusmodi arcus effigiem effectam spectantes probavere, eamque ducendi arcus rationem ad opera lapidea transferentes integrum additamentis arcum effecere.“

an die Strukturmechanik sowohl inhaltlich als auch methodisch von der Herangehensweise Leonardos, etwa bezüglich des Bruchmechanismus der Bögen.<sup>48</sup>

Ein weiteres bedeutendes historiografisches Problem betrifft die Frage, ob oder inwieweit Galileo Kenntnis von den *Exercitationes* hatte. Zahlreiche Dokumente belegen, dass Baldis Werk von zeitgenössischen Wissenschaftlern diskutiert wurde. Im Buch des Mediziners und Mathematikers Daniel Mögling, *Mechanischer Kunst-Kammer Erster Theil* (1629), findet man sogar eine partielle Übersetzung der *Exercitationes* Baldis mitsamt Abbildungen, die viele der Druckfehler der Originalausgabe beseitigen. Eine ähnliche Bezugnahme auf den Text von Baldi kann man in den 1627 veröffentlichten *Commentari*<sup>49</sup> zu den *Mechanischen Problemen* des Wissenschaftlers und Bischofs von Teano, Giovanni de Guevara, feststellen, die von Galileo 1638 in den *Discorsi* zitiert werden. Es ist bekannt, dass Guevara in brieflichem Kontakt mit Galileo stand und ihn mehrmals bezüglich der *Mechanischen Probleme* befragte.

Trotz dieser Verbreitung des Werkes auf europäischer Ebene wird Baldi von Galileo in seinen *Discorsi* nicht zitiert, und sein Name findet in der reichen Korrespondenz des Wissenschaftlers aus Pisa keine Erwähnung. Galileo wird aber zumindest indirekt durch gemeinsame Gesprächspartner Kenntnis von Baldis Werk gehabt haben.

#### 4.4 Von Urbino nach London, über Venedig

Dieselbe *Quaestio XVI* der *Mechanischen Probleme* dient dem englischen Gelehrten Henry Wotton<sup>50</sup> als Ausgangspunkt für die Formulierung der fünf Theoreme über die Gewölbe in seinen *Elements of Architecture* (1624), wo der Architekt als *Diver into Causes* dargestellt wird (in der Tradition von Aristoteles und Vitruv). Die Relevanz von Wottons *Elements of Architecture*, seinem ersten Buch (publiziert, als er 56 war), ist inzwischen anerkannt, obwohl manche Historiker sie weiterhin ignorieren.<sup>51</sup> Noch unerforscht bleibt jedoch bis heute der Einfluss von Baldi auf Wotton, obwohl die in den *Elements* enthaltenen fünf Theoreme über die Gewölbe,<sup>52</sup> eine der hauptsächlichen ‚Neuheiten‘ des Textes darstellen und diese wiederum gänzlich von der Lektüre der *Exercitationes* stammen. Es ist hier nicht möglich, alle Theoreme näher zu betrachten,<sup>53</sup> so dass nur das Zweite als Beispiel herausgegriffen werden soll; so, wie es bei Wotton erscheint:

„Wenn Bausteine der üblichen rechteckigen Form einer neben dem anderen waagrecht zwischen Stützen gelegt werden, welche die Enden dieser Lage halten, dann werden zwangsläufig alle Steine zwischen diesen Stützen herunterfallen, schon allein durch die ihnen eigene natürliche Schwere. Dies gilt umso mehr, wenn sie eine Belastung durch ein zusätzlich auf ihnen lastendes Gewicht

<sup>48</sup>Vgl. Becchi 2004.

<sup>49</sup>de Guevara 1627.

<sup>50</sup>Henry Wotton (1568–1639), Provost von Eton und lange Zeit Botschafter von Jacob I., König von England und Schottland, in Venedig.

<sup>51</sup>Im Buch von Neumeyer *Quellentexte zur Architekturtheorie* – Neumeyer 2002 – findet Wotton keinen Platz. Aus der spärlichen Literatur zum Thema sollen folgende Beiträge genannt werden: das ausgezeichnete Essay von Werner Oechslin (2002) *Philosophemur: Zu Henry Wottons Elements of Architecture*, die *Introduction* von Frederick Hard in Wotton 1968, sowie das unverzichtbare Werk von Logan Pearsall Smith (1907).

<sup>52</sup>Wotton 1624, 47–50.

<sup>53</sup>Becchi 2005.



aushalten müssen. Denn weil ihre Seiten parallel zueinander ausgerichtet sind, haben sie, dem vorangehenden Theorem entsprechend, genügend Raum, ungehindert senkrecht fallen zu können. Damit sie also halten, müssen wir entweder ihre Lage ändern, oder ihre Form, oder beides.“<sup>54</sup>

In Bezug auf die „naturwissenschaftlichen“ Interessen von Wotton sind immer wieder einige prägende Ereignisse in seiner Biografie erwähnt worden, die inzwischen zu topoi der Historiografie über dieses Thema geworden sind. Dies sind in Kürze: Die Schrift *De oculo*, die Wotton verfasste, als er in Oxford studierte; die lang anhaltende Freundschaft mit Francis Bacon, der 1625 den Essay *On Building* veröffentlichte; der berühmte Besuch von Wotton bei Kepler; die ausgesuchte Qualität der naturwissenschaftlichen Werke, die durch Wotton nach England gelangen. In einer nach 1628 zusammengestellten Liste von italienischen Werken werden, zusammen mit 30 anderen, folgende Titel erwähnt:

„[...] 29. Die Automati von Heron von Alexandria, in 4°. 30. Die Spiritali von ebendiesem, mit Illustrationen, in 4°. 31. Die Prospettiva von Euklid, kommentiert von Ignatio Danti, in 4°. 32. Die Geographia von Maurolico, in 4°. [...] 36. Eine Abhandlung, in 4°, von Galileo über die schwimmenden Körper.“<sup>55</sup>

Diese Daten sind sicher für Wottons naturwissenschaftliche Bildung bedeutend aber sie stellen nur einen Teil der Einflüsse dar, die für seine Entwicklung ausschlaggebend waren.

Es stellt sich die Frage, ob er nicht englische Vorbilder in diesem Feld hatte, an denen er sich hätte anlehnen können. Es deutet hier vieles auf ein bestimmtes Werk, einen kurzen Essay, der in England grosse Resonanz hatte: der *Mathematicall Praeface* von John Dee zur englischen Übersetzung der *Elementa* von Euklid.<sup>56</sup> Die Einleitung von Dee zeigt hierbei einen neuen, bis dahin in diesem Kontext unbekanntem Ansatz: Er stellt die Verbindung zwischen Mathematik und Architektur als unverzichtbar dar und erklärt Vitruv und Alberti zu Meistern dieser Verbindung.

Der *Praeface* ist als eine wichtige Etappe zwischen dem mittelmässigen *The First and Chief Groundes of Architecture* von John Shute (1563) und den *Elements* von Wotton anzusehen. Diese drei Texte haben den Weg zur Entstehung einer eigenständigen architektonischen Literatur in England bereitet, die sich von Anfang an gegenüber den ‚kontinentalen‘ Vorbildern unterschied. Es ist kaum vorstellbar, dass Wotton sich der Faszination und Autorität des *Praeface* entziehen konnte.

<sup>54</sup> „Bricks moulded in their ordinary Rectangular forme, if they shall be lays one by another in a levell row, betweene any Supporters sustayning the two ends, then all the pieces between, will necessarily sinke, even by their owne naturall Gravity, and much more if they suffer any depression by other waight above them, because their sides being paralell, they have roome to descend perpendicularly, without impeachment, according to the former Theoreme; Therefore to make them stand, wee must either change their Posture, or their Figure, or both.“, siehe Wotton 1624, 47; vgl. auch Baldi 1621, 105–106.

<sup>55</sup> „[...] 29. Gli Automati di Heron, Alessandrino, in 4°. 30. Gli Spiritali del Medesimo, con figure, in 4°. 31. La Prospettiva d’Euclide comentata di Ignatio Danti, in 4°. 32. La Geographia di Maurolico, in 4°. [...] 36. A discourse, in 4°, written by Galileo sopra le cose che nuotono.“, vgl. Smith 1907, Bd. I, 484–486. Leicht identifizierbare Werke, ‚Geographia‘ steht für ‚Cosmographia‘.

<sup>56</sup> John Dee, *Mathematicall Praeface*, in: Euklid (1570). Das Werk von Euklid war nicht nur im Laufe der gesamten Renaissance ein unverzichtbares Vorbild, sondern erfuhr auch gerade zu Wottons Zeiten einen grossen verlegerischen Erfolg (im Jahr 1607 entstand sogar die berühmte partielle Übersetzung ins Chinesische von Matteo Ricci und Su Guan Xi).

Die Spuren des Einflusses von Dee und Euklid auf die *Elements* von Wotton sind zwar nicht zahlreich, dennoch überaus bedeutsam. Dies wird auch nicht dadurch relativiert, dass Dee und Euklid in den *Elements of Architecture* nie genannt werden. Dasselbe ist nämlich in wenigstens zwei weiteren Fällen zu beobachten: Sebastiano Serlio und Vincenzo Scamozzi. Ihre Werke waren Wotton geläufig, ihre Abwesenheit kann daher nur geplant und gewollt sein. Im Folgenden werden einige Spuren offengelegt, die auf Euklid verweisen:

1. Der Titel, damals gar nicht gängig für ein architektonisches Werk: *Elements, Elementa* (Elements of Geometry/Elements of Architecture).
2. Die Verwendung der Wörter ‚Theorem‘ und ‚Korollar‘ in Verbindung mit der Gewölbetheorie: Auch diese Termini waren ohne Beispiel in der architektonischen Fachliteratur. Sogar Baldi, der Mathematiker und Mechaniker war, hatte sie nicht benutzt, um die Ideen zu beschreiben, die Wotton treu wiedergibt. Darüber hinaus ist die Verwendung des Wortes ‚Elementa‘ (Elements) mit der Benutzung des Wortes ‚Theoremata‘ (Theoremes) verbunden, wie auch zum Beispiel Federico Commandino in seiner Einleitung zu den *Elementa* von Euklid erklärt.<sup>57</sup> Diese von Wotton in der zeitgenössischen englischsprachigen Literatur eingeführten Begriffe und Verbindungen beeindruckten als Besonderheit seine Zeitgenossen sehr nachhaltig. John Evelyn (1664) wird zum Beispiel über ihn in diesen Worten berichten: „Sir Henry Wotton in seinen Kurz gefasste und Nützliche Lehrsätze[...]“ und gleich weiter schreibt er von der Architektur als „der Blüte und Krone, die sie unter allen mathematischen Wissenschaften sei“.<sup>58</sup>
3. Die Zahl fünf: fünf Theoreme, fünf Postulate von Euklid. Wotton verwendet sie scheinbar völlig willkürlich, wie man feststellt, wenn man die Theoreme näher betrachtet, die in Wirklichkeit vier sind. Es ist wahrscheinlich, dass die Wahl dieser Zahl auch von der Rosenkreuzerphilosophie beeinflusst wurde, aber in dem Punkt ist die hier vorgestellte Forschung noch am Laufen. Diesbezüglich sollte die alte und glückliche Intuition von Francis Yates – „John Dee, Robert Fludd, Inigo Jones. Diese drei Persönlichkeiten sind noch nie in dieser Abfolge betrachtet worden. Das folgende Kapitel wird die These aufstellen, dass die Identifizierung von Einflüssen Vitruvs auf Dee und Fludd einen neuen historischen Zugang zu Inigo Jones erfordert“<sup>59</sup> – erweitert werden.<sup>60</sup> Nach dem heutigen Stand hat auch der Name Henry Wotton die Aufnahme in diese Liste verdient. Commandino, mit dem Dee in engem Kontakt stand,<sup>61</sup> hatte zwei Übersetzungen von Euklid herausgegeben, welche Zeichnungen von Baldi enthielten.
4. ‚Mathematik‘, ‚Mechanik‘, ‚Natur‘. Weiter können wir feststellen, dass Wotton zwischen einer ausschliesslich mathematischen und einer mechanischen Herangehensweise unterscheidet. Dies geht zum Beispiel aus Seite 41 der *Elements* hervor, wo er, nachdem er über die optischen Korrekturen der Säulen berichtet hatte, schreibt:

<sup>57</sup>Vgl. Euklid 1572.

<sup>58</sup>„Sir Henry Wotton in his Concise and Useful Theorems [...] the Flower and Crown as it were of all the Sciences Mathematical.“, Evelyn 1664, 118.

<sup>59</sup>„John Dee, Robert Fludd, Inigo Jones. These three personages have never before been placed in a sequence. The next chapter will suggest that the discovery of Vitruvian influences in Dee and Fludd makes necessary a new historical approach to Inigo Jones.“, Yates 1969, 78.

<sup>60</sup>Wie allgemein bekannt hat Yates Wotton in anderen Schriften behandelt, ohne aber diese Forschungslinie zu vertiefen.

<sup>61</sup>Vgl. Dee 1570.

„zu bevorzugen sind, nach dem Vorbild erfahrener Handwerker, natürliche gegenüber mathematischen Begründungen und sinnlich wahrnehmbare Zugänge gegenüber theoretischen.“<sup>62</sup> Diese Passage ist ein Pendant zu jener aus dem vierten Theorem (S. 49–50), wo die Aussage von Baldi über die Schwäche von Rundbögen glossiert wird: „an dieser Stelle möchte ich beiläufig festhalten, dass, wenn irgendetwas mathematisch schlecht begründet ist, es in mechanischer Hinsicht noch unzureichender ist: Fehler geschehen immer weit eher beim Umgang mit konkreten Werkstoffen als auf der Ebene von Zeichnungen.“<sup>63</sup>

Die Verwendung von Begriffen wie ‚naturall‘, ‚mathematicall‘, ‚mechanicall‘, ‚logicall‘ und so weiter würde eine separate Betrachtung verdienen. Hier sei nur angemerkt, dass in den semantischen Abweichungen dieser Begriffe ein Echo der Debatte wiederzufinden ist, die in der frühen Renaissance Ingenieure, Architekten und Mechaniker angefeuert hatte und die ein wichtiges Diskussionsthema zwischen Galileo Galilei und Antoine de Ville werden sollte. Aus heutiger Perspektive sieht man in diesen Diskussionen auch anderes. Es ging nämlich um die Unterscheidung zwischen *mécanique naturelle* und *mécanique artificielle*, die ein Streitross der Vorwürfe der Architekten gegen die neue *art de l'ingénieur* werden sollte.<sup>64</sup> Wenn man diesbezüglich noch jüngere Zeiten betrachtet, kann man im Urteil von Pol Abraham über die *mécanique romancée* von Viollet-le-Duc die gleiche Perspektive erkennen.

Weder Baldi noch Wotton wurden für Architekten gehalten, sondern eher für Konstrukteure von Luftschlössern, wie Lord Chamberlain einmal geschrieben hat:

„Ich habe gehört, dass Wotton sich nun in irgendeine Ecke des Landes zurückgezogen hat, um ein angefangenes Werk zu den mathematischen Wissenschaften, oder vielleicht auch zum Bauen von Luftschlössern, zu vollenden.“<sup>65</sup>

Vielleicht haben die Architekten (und die Historiographen) deswegen bis jetzt beide vernachlässigt.<sup>66</sup> Vielleicht war Galileo aus demselben Grund sicher, als Vater einer neuen Wissenschaft „Zur Festigkeit belasteter Körper“<sup>67</sup> bejubelt zu werden. In Wirklichkeit war er jedoch nur ihr Stiefvater.

Die Schriften Leonardos und Galileis sind demnach zwei wichtige, aber nicht isolierte Etappen einer immer engeren Beziehung zwischen Mechanik und Architektur. Baldi rechnete Probleme des Bauens nachdrücklich zu den wichtigen Fragen der Mechanik und hatte damit einen idealen Platz für eine Auseinandersetzung zwischen Theorie und Praxis, zwischen mechanischen Prinzipien und ihrer Anwendung gefunden. Seiner Ansicht nach ist

<sup>62</sup> „preferring like a wise Mechanick, the naturall Reason, before the Mathematicall, and sensible conceits before abstracted.“, Wotton 1624, 49–50.

<sup>63</sup> „where let me note by the way, that when any thing is Mathematically demonstrated weak, it is much more Mechanically weake: Errors euer occurring more easily in the management of Grosse Materials, then Lineall Designes.“, Wotton 1624, 49–50.

<sup>64</sup> Vgl. Becchi 1999.

<sup>65</sup> „I heare [Wotton] is now retiring to some corner in the countrie to finish a worke he is setting out of the mathematikes or perhaps building of castles in the ayre.“, John Chamberlain, Brief an Dudley Carleton (London, den 31. Januar 1624, n.s.); vgl. Smith 1907, Bd. I, 194.

<sup>66</sup> Was über Wotton geschrieben wurde, gilt auch für Baldi: „Wenig gelesen, wenig verstanden, das bezeichnet wohl das eigentliche Schicksal von Wottons Elements of Architecture – wohl bis auf den heutigen Tag.“, Oechslin 2002, 267.

<sup>67</sup> „sulla resistenza dei corpi ad esser spezzati.“, Galilei 1638.

die Architektur *Theatrum pro experimentalis philosophia*. Bis zum Anfang des 18. Jahrhunderts sollten sich zwischen Architekturtraktaten und Studien zur Mechanik viele weitere Berührungspunkte ergeben. Danach, mit der Einführung neuer mathematischer Methoden, trennten sich diese beiden Linien endgültig, und es entstanden die disziplinären Grenzen, die noch heute die Kultur der Architekten von der der Ingenieure trennen.

Für Bernardino Baldi handelte es sich dagegen nicht um ein Problem der Kompetenzen, sondern um einen substanziellen Unterschied im „Ornament“ des Geistes. Er hatte dies in der *Vita Vitruvi* klar ausgedrückt, als er die Idee, Vitruv und Leon Battista Alberti in die *Vite de' matematici* aufzunehmen, verteidigte:

„Die Masse der praktischen Architekten wird mich anklagen, wenn ich anstelle von ihnen über Vitruv und Leon Battista schreiben werde. Doch diese, geschmückt, wie man sagt, mit allen Waffen, haben das Kampfrecht im Heer der Mathematiker, deren Biografien ich schreiben werde. Dasselbe sage ich den nur praktisch arbeitenden Mechanikern, auch wenn sie mittels der einfachen Praxis Wunder bewirkt haben.“<sup>68</sup>

#### 4.5 Die science des architectes

Baldi und Galileo hatten das Problem des Balkens mit dem Konzept des geknickten Hebels gelöst. Hebel und Keil standen auch im Mittelpunkt der Theorie des Bogens. Das statische Verhalten von Bogen und Gewölbe wurde von Johann Esaias Silberschlag als „das Räthsel der Architektur“<sup>69</sup> beschrieben: ein solches sollte es sowohl für den praxisorientierten Architekten als auch für den Theoretiker lange bleiben. Die ‚beste Form‘ eines Gewölbes zu ermitteln, den Gewölbeschub zu berechnen und die optimale Krümmung einer Kuppel zu bestimmen, schienen unlösbare Aufgaben zu sein. Mit der Suche nach einer Lösung zu diesem Problem beschäftigten sich am Ende des 17. Jahrhunderts die *Académie royale des sciences* in Paris und die *Royal Society* in London.

In der *Royal Society* waren Robert Hooke und Christopher Wren die Protagonisten. Die Ergebnisse der dortigen Debatte füllen keine halbe Seite, zumindest wenn man von den, in den *Proceedings* enthaltenen Informationen, ausgeht. Dass sich die Zeugnisse auf wenige Hinweise beschränken, liegt wohl nicht nur an der Zurückhaltung Hookes, die man auf seine Angst vor Ideenraub zurückführen könnte. Wahrscheinlich leitete ihn auch die

<sup>68</sup> „Taccia dunque la turba de gli Architetti pratici, se io scriverò di Vitruvio e di Leon Battista, e non di loro, poichè egli, ornati, come si dice, di tutte l'arme, hanno ragione di militia ne l'essercito de' Matematici, de' quali io vo scrivendo le vite. L'istesso dico a' Mecanici semplicemente pratici, ancorchè per semplice pratica habbiano fatto meraviglie.“, vgl. Narducci 1886, 464. Diese Passage und insbesondere der Ausdruck „geschmückt, wie man sagt, mit allen Waffen“ sind ein wörtliches Zitat Vitruvs selbst, vgl. Vitruv 1488, Buch I. Zu den *Vite de' matematici* siehe auch Baldi 1998.

<sup>69</sup>Silberschlag 1786, Abschnitt 676, 236: „Steinerne Brücken erfordern auch steinerne Gewölbobogen, welche auf den massiven Pfeilern ruhen. Und nun gerathen wir an eine Materie, die mit Recht das Räthsel der Architektur genennet wird. Der erfahrene Nürbergische Architekt Jacob Schübler wünschet in seiner Zimmermanskunst, daß ein jeder, der in dem Geheimnisse der Wölbkunst etwas zuverlässiges gefunden, solches zum Besten des gemeinen Bestens bekannt machen möchte. Dieses ist häufig genug geschehen, demohngeachtet sind wir noch nicht weiter gekommen, als daß wir nunmehr die beste Gewölblinie anzugeben wissen. Zu Ansehung der Breite der Bogen und Stärke der Widerlagen tappen wir noch immer im Finstern herum, und jedweder Architekt ersinnet sich nach seiner Vorstellung, die er sich vom Drucke und Gegendrucke der einzelnen Theile der Wölbung macht, seine eigene Methode, der er folget.“

Unvollkommenheit der Ergebnisse dazu, die Erträge seiner Studien nicht zu publizieren. Hier zwei Beispiele des wiederholten ‚Schweigens‘, wie es am 15. Dezember 1670 in den zugänglichen Protokollen festgehalten wurde:

„Mr. Hooke stellte eine grafische Methode vor, einen Bogen zu zeichnen, der jedes mögliche Gewicht tragen könne. Gefragt, ob er davon auch eine Vorführung machen könne, antwortete er, dass er dies vor dem Präsidenten getan habe, der bei dieser Zusammenkunft nicht anwesend war.“<sup>70</sup>

Am 19. Januar 1671 heisst es:

„Dr. Wren führte dem Präsidenten die spezielle Linie vor, die ein Bogen beschreibt, der geeignet ist, jedwedes Gewicht zu tragen. [...] Als Mr. Hooke zu seiner Vorführung desselben Problems gerufen wurde erklärte er, dass er dem Präsidenten bereits deren Quintessenz erläutert habe. Dieser habe jedoch den Wunsch geäußert, dass er sie auch schriftlich vorlege, damit sie eingehender und bequemer untersucht werden könne.“<sup>71</sup>

Erst elf Monate später wird die geheimnisvolle Lösung einen Namen erhalten, obwohl die Details immer noch nicht offenbart werden. Der Eintrag vom 7. Dezember 1671 lautet:

„Mr. Hooke zeichnete die Gestalt des Bogens einer Kuppel zum Tragen unterschiedlicher Lasten und deutete sie als Konoid einer kubischen Parabel. Er ergänzte, dass damit alle architektonischen Probleme von Bögen und Strebe- Pfeilern bestimmt werden könnten.“<sup>72</sup>

Es handelt sich um die auf der Analogie Bogen – Kettenlinie basierende Lösung, die Hooke 1676 im Buch *A description of helioscopes and some other instruments* als Anagramm veröffentlichen wird.<sup>73</sup> Der letzte Teil des Textes, in dem der Autor aufzählt, was er zu publizieren gedenkt

„(zehn von den hundert Erfindungen möchte ich veröffentlichen, wenn auch wahrscheinlich nicht in derselben Reihenfolge, sondern so, wie ich dazu Gelegenheit und Muße finde. Ich hoffe, dass die meisten von ihnen der Menschheit nutzen werden, da sie bis jetzt unbekannt und neu sind).“<sup>74</sup>

<sup>70</sup> „Mr. Hooke represented the mechanical way of making an arch of such a figure, as shall sustain any weight given. Being asked, whether he had ready the demonstration of it, he answered, that he had given it to the president, who was absent from this meeting.“, Birch 1756, 461.

<sup>71</sup> „Dr. Wren delivered to the president his demonstration of what line it is, which an arch, fit to sustain any assigned weight, makes. [...] Mr. Hooke being called upon for his demonstration of the same subject answered, that he had already declared the substance of it to the president, who yet desired him to give it also in writing, that so it might be with more leisure and conveniency examined.“, Birch 1756, 465.

<sup>72</sup> „Mr. Hooke produced the representation of the figure of the arch of a cupola for the sustaining such and such determinate weights, and found it to be a cubico-paraboli-conoid; adding, that by this figure might be determined all difficulties in architecture about arches and buttments.“, Birch 1756, 498.

<sup>73</sup> Vgl. auch Heyman 1998.

<sup>74</sup> „(a *decimate* of the *centesme* of the Inventions I intend to publish, though possibly not in the same order, but as I can get opportunity and leisure; most of which, I hope, will be as useful to Mankind, as they are yet unknown and new).“

betrifft die zweite Invention, die Bogen:

„Die wahre mathematisch und mechanisch definierte Form aller Arten von Bögen zum Bauen, mit dem jeweils erforderlichen, passenden Strebepfeiler. Ein Problem, dem sich bislang kein Autor von Architekturtraktaten jemals gestellt hat.<sup>75</sup>

Mit der Analogie Bogen – Kettenlinie stand er zu seiner Zeit nicht allein: Mit demselben Thema beschäftigten sich unter anderem David Gregory im *Essai De Curva Catenariae Demonstrationes Geometricae* (1697), und James Stirling, der in den 1717 erschienenen *Lineae Tertii Ordinis Neutoniana* den *Methodus disponendi quocunque Sphaeras in Fornicem* beschrieb.<sup>76</sup>

Die Gründe für dieses Interesse an Gewölben und Kuppeln sind klar: In Verbindung mit dem Wiederaufbau nach dem Great Fire von 1666 und insbesondere mit dem Kuppelentwurf für die St. Paul's Cathedral formulierten Hooke und Wren Hypothesen über das mechanische Verhalten gewölbter Strukturen. Die überlieferten schriftlichen Quellen suggerieren, dass Wren diesbezüglich zu keinem bedeutenden Ergebnis kam. Die *Tracts on Architecture*,<sup>77</sup> partiell in den *Parentalia*<sup>78</sup> veröffentlicht, zeigen einen überholten Ansatz, der nichts Neues zu den zwei Jahrhunderte zuvor angestellten Überlegungen von Leonardo da Vinci oder von Bernardino Baldi am Anfang des 17. Jahrhunderts hinzufügte. Denselben Forschungsstand zeigt das, allerdings aus einem anderen kulturellen Kontext stammende Buch *Templum Vaticanum* (Fontana 1694) von Carlo Fontana.

Neben den schriftlichen Quellen soll hier auch die tatsächlich gebaute Architektur berücksichtigt werden. Die Kuppel der St. Paul's Cathedral zeugt von einer guten Beherrschung der konstruktiven Techniken, obwohl ihre Konstruktionsweise im Vergleich zu den bekannten Beispielen in Florenz (S. Maria del Fiore) und Rom (S. Pietro) nicht auf ein wesentlich besseres Verständnis vom mechanischen Verhalten des Objektes *Kuppel* hindeutet.

Um in jener Zeit eine weitergehende Beschäftigung mit dem mechanischen Verhalten von Bögen, Gewölben und Kuppeln zu finden, muss man nach Paris schauen. Philippe La Hires im Jahre 1712 formulierte Beschreibung des Problems bestätigt zwangsläufig die bereits bekannten Schwierigkeiten:

„Das ist eines der schwierigsten Probleme in der Architektur, nämlich die Kraft zu kennen, welche die Pfeiler der Gewölbe haben müssen, um deren Schub auszuhalten. Die Architekten haben bis heute keine gesicherte Regel gefunden, um sie zu bestimmen.“<sup>79</sup>

<sup>75</sup> „2. The true Mathematical and Mechanichal form of all manner of Arches for Building, with the true butment necessary to each of them. A Problem which no Architectonick Writer hath ever yet attempted.“, Hooke 1676, 31. Das Anagramm wird später von Richard Waller (1705, XXI) wie folgt interpretiert: „Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum, which is the *Linea Catenaria*.“ Über dasselbe Thema schreibt Hooke in seinem Tagebuch (am 26. September 1675): „Riddle of arch, of *pendet continuum flexile, sic stabit grund Rigidum*.“, vgl. Robinson und Adams 1935, 182.

<sup>76</sup> Vgl. für weitere Untersuchungen zu diesem Thema, die auch den grundlegenden Beitrag von Jacob Bernoulli berücksichtigen Truesdell 1960; Benvenuto 1991.

<sup>77</sup> Vgl. Soo 1998; Bolton und Duncan 1942.

<sup>78</sup> Wren 1750.

<sup>79</sup> „C'est un problème des plus difficiles qu'il y ait dans l'Architecture, que de connoître la force que doivent avoir les pieds droits des voûtes pour en soutenir la poussée, les Architectes n'ont trouvé jusqu'à présent aucune regle certaine pour la déterminer.“, La Hire 1712, 69.

Wo die Architekten scheiterten, könnten endlich die Mechaniker Erfolg haben.

Philippe de La Hire<sup>80</sup>, angesehenes Mitglied der Pariser *Académie royale des sciences*, stellte den Kollegen unter anderem zwei wichtige Abhandlungen über den Gewölbebau vor. Es handelt sich um die inzwischen allgemein bekannten Texte *Proposition 125 des Traité de mécanique*<sup>81</sup> von 1695 und das *mémoire* mit dem Titel *Sur la construction des voûtes* aus dem Jahre 1712. Weniger bekannt ist die Tatsache, dass diese nicht nur der internen Diskussion an der *Académie royale des sciences* entsprangen, sondern auf die von La Hire an der, ebenfalls in Paris ansässigen, *Académie royale d'architecture* gehaltenen Vorlesungen zurückzuführen sind, welche in den unveröffentlichten *mémoires* aus den Jahren 1692 und 1711 überliefert sind. Es handelt sich hierbei um folgende Beiträge: *Remarques sur l'époisseur qu'on doit donner aux pieds droits des voutes et aux murs des dômes ou voutes de four* vom 27. Oktober 1692 und *Règle générale pour déterminer la largeur de la face des piédroits des arcs, lesquels puissent résister à l'effort avec lequel l'arc les escarte, ce qu'on appelle l'effort de la poussée sur la hauteur donnée de ses piédroits* vom 30. Juni 1711.<sup>82</sup>

La Hire war nicht nur Mitglied der *Académie des sciences*, sondern auch der *Académie d'architecture*. An dieser hatte er dreissig Jahre lang, als Nachfolger deren Gründers François Blondel, die Leitung inne, wenn auch nicht offiziell als Direktor, so doch *de facto*.<sup>83</sup> Die oben genannten Texte La Hires, die alternierend für die Architektur- und die Wissenschaftsakademie verfasst wurden, zeigen eine enge Abhängigkeit vom unterschiedlichen Publikum der jeweiligen Institution. Es ist bedeutsam, dass die beiden an der *Académie d'architecture* vorgestellten Texte nie publiziert wurden. Das Schicksal, Manuskript geblieben zu sein, teilen zwei von La Hires Traktaten: das *Traité de la coupe des pierres* (1690)<sup>84</sup> und das *Architecture civile* (1698).<sup>85</sup> Auch sie wurden im Rahmen seiner didaktischen Tätigkeit für die Architekturstudenten verfasst.

Darüber hinaus ist bemerkenswert, dass bereits die einfache Lektüre dieser Texte die Hintergründe verrät, welche La Hire zur Klärung des mechanischen Problems geführt hatten. Die *mémoires* gingen unmittelbar aus dem Studium der klassischen architektonischen Literatur hervor, insbesondere der Bücher Albertis, Palladios und Scamozzis, von dessen *Idea dell'architettura universale* (1615) La Hire ganze Kapitel ins Französische übersetzte, um sie im Rahmen der *Académie d'architecture* lesen und diskutieren zu können. Es wundert also nicht, dass La Hire auf eine Passage des Buches *De re aedificatoria* von Alberti zurückgriff und auf dieser Grundlage seine Argumentationen entwickelte.<sup>86</sup>

<sup>80</sup>Vgl. Becchi, Rousteau-Chambon und Sakarovitch 2013.

<sup>81</sup>Das Traktat beinhaltet 126 Propositions.

<sup>82</sup>Die *Procès-verbaux* der *Académie d'architecture* wurden zwischen 1911 und 1926 in 9 Bänden (zuzüglich eines Indexbandes, gedruckt 1929) von Henry Lemonnier publiziert, vgl. Lemonnier 1911–1929. In jenen Büchern, die ansonsten äusserst gewissenhaft geführt sind, fehlen, bis auf den Titel, jegliche Hinweise zu La Hires *mémoire* vom 30. Juni 1711, vgl. La Hire 1711. Vielleicht hat Lemonnier diese Handschrift übersehen oder als unwichtig erachtet. In jedem Fall ist sie in den Archiven des *Institut de France* vorhanden. Eine Transkription von La Hires Beitrag *Remarques sur l'époisseur* von 1692 ist in Band 2 der *Procès-verbaux*, S. 345–349, zu finden.

<sup>83</sup>Vgl. zur Geschichte der *Académie royale d'architecture* Schöllner 1993.

<sup>84</sup>Andere Exemplare befinden sich in den folgenden Bibliotheken: Bibliothèque de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (Paris), Bibliothèque municipale (Rennes), Bibliothèque municipale (Langres). Vgl. zu diesem Thema Becchi 2002 und Becchi, Rousteau-Chambon und Sakarovitch 2013.

<sup>85</sup>Das Traktat wird erstmals am 20. Oktober 1698 an der *Académie d'architecture* vorgestellt, vgl. Lemonnier 1911–1929, Bd. 3, 51.

<sup>86</sup>Vgl. Alberti 1485, Buch VII.

La Hires mechanisches Modell steht zudem in der französischen Tradition der Stereotomie und hängt in enger Weise von der im Rahmen der *architecture à la française* entwickelten Praxis ab.<sup>87</sup> Bevor er zur mechanischen Analyse übergang, die den fragilen Empirismus der Regel Derands<sup>88</sup> überwinden sollte, machte La Hire eine entscheidende Vorbemerkung, die das gesamte spätere Prozedere beeinflusste: Wenn in einem steinernen Gewölbe,

„würden alle Gewölbesteine mit derselben Kraft ganz in Richtung des Zentrums des Gewölbes geschoben“<sup>89</sup>

dann würde dieses Gewölbe keinen Druck auf die Widerlager ausüben,

„denn der Schlussstein und die ihm benachbarten, darüberliegenden Gewölbesteine würden nicht mehr Kraft ausüben als wenn sie alle miteinander verbunden wären und als wenn sie nur einen festen Körper darstellen würden, von dem man die Kraft bestimmen müsste wie die eines einzigen ganz geraden Steines, der so viel wiegen würde wie alle Gewölbesteine zusammen und waagrecht auf den Pfeilern gelagert wäre.“<sup>90</sup>

Das verwendete Modell beruht auf der Annahme einer monolithischen Architektur „ein einziger Stein“ (*une seule pierre*), auch wenn diese aus kleinformatischen Materialien wie Steine oder Ziegel gefügt ist. Das Diskrete, das sich wie das Kontinuum verhält, eine scheinbar widersprüchliche Konstruktionsvorstellung, stellte die Grundlage für die stereotomische Kunst dar. Diese Aspekte wurden allerdings in der *Proposition 125* nicht mehr thematisiert, weshalb die im *Traité de mécanique* verwendete Beweisstrategie unverständlich blieb.

Beachtenswert ist auch das von La Hire für seine *mémoires* gewählte Verfahren. Die auf dem Hebelprinzip basierende mechanische Erklärung (im *mémoire* von 1712) ist überzeugend und wird heute noch in unseren Vorlesungen genutzt. Niemand erinnert sich hingegen an die ‚geometrischen‘, mit Zirkel und Lineal ausgeführten Lösungen, die La Hire<sup>91</sup> seinem *mémoires* von 1711 und 1712 anhängte. In Wirklichkeit handelt es sich um beschwerliche, nicht anwendbare Verfahren, die unmittelbar verworfen wurden und sicherlich bereits damals nicht der mechanischen Intuition zum Hebelprinzip entsprachen. In diesem Punkt könnte man das strenge Urteil von Johann Bernoulli teilen:

„[De La Hire] sah etwas, aber das, was er hätte sehen können, verstand er nicht.“<sup>92</sup>

Tatsächlich markiert der von La Hire beschrittene Weg den schwierigen Übergang von den alten *firmitas*-Gedanken, die bereits von Baldi und Galilei scharfsinnig kritisiert wor-

<sup>87</sup>Vgl. Becchi 2013b.

<sup>88</sup>Derand 1643. Vgl. Becchi 2010.

<sup>89</sup>„tous les voussoirs estoient tous poussez vers le centre de la voûte avec un mesme effort“, La Hire 1692.

<sup>90</sup>„car la clef et les voussoirs d'en haut qui en sont proches ne feroient pas plus d'effort que s'ils estoient tous joints ensemble et s'ils ne faisoient qu'un mesme solides, dont il faudroit considérer l'effort comme celui d'une seule pierre toute droite pesant autant que tous les voussoirs ensemble et posée de niveau sur les pieds droits.“, La Hire 1692.

<sup>91</sup>Wie auch Amédée François Frézier wenige Jahre später, vgl. Frézier 1737–1739, Bd. 3, Kap. XII.

<sup>92</sup>„[De La Hire] Vidit aliquid; quid autem viderit, ipse non intelligit.“, Brief an Gottfried Wilhelm Leibniz vom 8. November 1698, vgl. Gerhardt 1855, Brief Nr. 85, 550. Das Zitat bezieht sich auf die Analogie Bogen – Kettenlinie, wie sie in dem *Traité de mécanique* von La Hire beschrieben wird.



den waren, zu neuen mechanischen Erklärungen. Diese beruhen auf sehr einfachen mechanischen Prinzipien, benötigen aber für eine analytische Beweisführung besondere mathematische Fähigkeiten: Die Integralrechnung wurde bald zum Kennzeichen der neuen *science de l'ingénieur*, die man der alten *art de bâtir* gegenüber stellte.

#### 4.6 Die *science des ingénieurs*

Bernard Forest de Bélidors *La science des ingénieurs* (1729) ist das erste an den Ingenieur gerichtete Handbuch, das der Baustatik mit entsprechenden Berechnungsverfahren und mechanischen Erläuterungen der Hauptprobleme von Bauwerken eine herausragende Rolle einräumte. Amédée François Frézier (1737–1739) der in seinem Werk einige Passagen von Bélidor in einem langen Anhang *concernant le dispositif à la Construction des Voutes* vertiefte, ging bereits davon aus, dass die Baukunst (*art de bâtir*) und die *science des ingénieurs* zusammengehörten. Hier zeigt sich jedoch auch die Schwierigkeit, zwei Wissensgebiete zusammenzuhalten, die im Lauf der Zeit zunehmend voneinander unabhängige Bereiche definierten: auf der einen Seite die mechanischen Studien derjenigen, die das mathematische Handwerkszeug beherrschten und eine entsprechende Modellbildung bevorzugten, auf der anderen Seite das konstruktive Wissen auf der Basis erfahrungsgeleiteter „Regeln der Kunst“, das Architekten und Ingenieure tatsächlich auf der Baustelle anwendeten. Eine Möglichkeit der Vermittlung zwischen den beiden Fronten schien das Experimentieren mit maßstabgetreuen Modellen darzustellen, wie im Fall der Versuche zum Bruch von Bogenkonstruktionen, die Danyzy 1732<sup>93</sup> der *Académie* von Montpellier präsentierte. Für lange Zeit führten die Schwierigkeiten, die mit einer eindeutigen Bewertung solcher Experimente verbunden waren, jedoch zu übermäßig vereinfachten Erklärungsmustern, die der Komplexität des konstruktiven Details nicht gerecht wurden.

An der 1747 in Paris gegründeten *École des Ponts et Chaussées* verstärkte sich der Impuls zur Spezialisierung von Ingenieuren und Architekten: Themen der Baustatik wurden Gegenstand detaillierter Diskussionen unter Mathematikern und Ingenieuren, den Architekten verblieb die Anwendung empirischer Regeln oder elementarer geometrischer Modelle. Damit verschärfte sich der Unterschied zwischen denen, die sich mit dem „Entwurf“ der Konstruktion im traditionellen Sinn beschäftigten und denen, die ihre Stabilität zu überprüfen und zu garantieren hatten. Diese Trennung ist an den entsprechenden Artikeln in der *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1778) von Denis Diderot und Jean Le Rond d'Alembert ebenso abzulesen wie in einem Werk, das sich speziell an die in der Baupraxis tätigen wandte wie der *Traité de l'art de bâtir* (1802–1817) von Jean Rondelet. Seine Synthese bautechnischen Wissens belegt die nun grundsätzliche Trennung der Kompetenzen, die neue, „mathematisierende“ Richtung fand dort keinen angemessenen Platz mehr. Auf der anderen Seite hatten die Arbeiten Leonhard Eulers aus den Jahren zwischen 1740–1780 bereits angedeutet, dass sogar ein scheinbar banales Problem wie das eines in Längsrichtung zusammengedrückten Stabes solide Kenntnisse der Differentialrechnung erforderte (Eulersche Knicktheorie). Auch die Denkschrift von Charles Augustin Coulomb *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture* (1773) hatte die Notwendigkeit einer angemessenen mathematischen Vorbildung für die mechanische Analyse des Einsturzes einer Bogenkonstruktion

<sup>93</sup>Danyzy 1778, 40–53.

betont. Eine solch elementare, nun für alle Aktivitäten im Bereich der Ingenieurkunst für unverzichtbar gehaltene Ausbildung konnte seit 1794 an der *École polytechnique* in Paris erworben werden, der ersten gehobenen Bildungsstätte für das polytechnische Wissen, das zum Dreh- und Angelpunkt der Industriellen Revolution werden sollte.

Der neue „mechanische“ Weg schien – zumindest den Intentionen nach – eingeschlagen worden zu sein. Die Überzeugung, man habe die Phase der „Kunstregeln“ hinter sich gelassen und sei endlich zu einer Kooperation zwischen Kunst und Wissenschaft gelangt, kennzeichnet einen Großteil der damaligen Literatur. Es ist interessant zu beobachten, dass unter den Verfechtern des Neuen, die dieses Neue aber nur vermeintlich durchdrangen, drei „Erklärungsstrategien“ großen und unmittelbaren Erfolg unter den Architekten hatten.

Als erste Erklärungsstrategie beobachtet man zunächst die Ungeduld, endlich eine allumfassende Antwort zu finden. Es ist das Lied der Sirenen des „Kein Ignorabimus“ und der universellen Formeln, die jedes Rätsels Lösung sind. Dieser Drang verwandelte die Kettenlinie in eine bequeme, allgemein anerkannte Antwort, die aber von den wenigsten verstanden und z. B. nur verspätet von der *Académie d'Architecture* in Paris gepriesen wurde. Hier sprach *le citoyen Mauduit* am 13. Mai 1793 mit Nachdruck über die *idée heureuse* von James Stirling:

„die als Fundament dieser wichtigen Theorie [des Gewölbeschubes] dienen müsste und die anscheinend von fast allen, die über dieses Thema gearbeitet haben, ignoriert worden ist.“<sup>94</sup>

Die bereits 1717 formulierte und unter anderem von Giovanni Poleni in seinen bekannten *Memorie istoriche della gran cupola del Tempio Vaticano* (1748) wieder aufgenommene Idee von Stirling war eigentlich bereits allgemein bekannt. Offensichtlich lasen die neuen *académiciens*, entfernte Erben von La Hire, allerdings nicht regelmäßig die wissenschaftlichen Veröffentlichungen über dieses Thema. Die Leidenschaft für die Kettenlinie weckt auch heutzutage noch immer wieder naive Begeisterung.

Die zweite Erklärungsstrategie entsprang der Überzeugung, das Verborgene mit Hilfe der Archäologie aufdecken zu können. Ein markantes Beispiel ist der von Giovanni Battista Piranesi angefertigte Kupferstich der Kuppel des Pantheons, veröffentlicht durch seinen Sohn Francesco.<sup>95</sup> Es handelt sich hierbei um eine partielle Fälschung, die jedoch den wenigsten als solche bekannt ist, da sie eine verführerische Darstellung von dem ist, was hinter den Architekturkulissen und „unter der Haut“ verborgen sein soll. Der Autor selbst hat sie als Nachweis definiert und behauptet, er hätte dieses Detail aufgenommen „so wie man es sah, als das Gebäude vom Putz befreit wurde“. Der bekannte Kupferstecher zeigt als Ergebnis einer intellektuellen Ausarbeitung eine Reihe von Bögen, die in dieser Form gar nicht existieren, wie die am Ende des 19. Jahrhunderts durchgeführten Untersuchungen von Luca Beltrami bewiesen haben. Hier kommt die ganze Leichtfertigkeit zum Ausdruck, mit der man sich in der Vergangenheit der Architektur und ihrer konstruktiven Details genähert hat, selbst im Fall von detailliert untersuchten Denkmälern. Dies wird besonders daran deutlich, dass der Stich heute noch von manchen als ein klarer Beweis für die konstruktive Rationalität der römischen Architektur angesehen wird.

<sup>94</sup> „Jaquelle devoit servir de base à cette théorie [la poussée des voûtes] importante et qui paroît ignorée de presque tous ceux qui ont travaillé sur cette matière.“, Lemonnier 1911–1929, Bd. 9, 344.

<sup>95</sup> Piranesi 1780, Tafel 18.

Die Leidenschaft für die Archäologie und besonders die Versuchung zu enthüllen, führt dazu, etwas zu sehen, was gar nicht existent ist. Diesem Trugschluss unterlagen einige Archäologen des 19. und viele Epigonen des 20. Jahrhunderts. „Iscuratori dell'intimo delle cose,“ wie Colantonio Stigliola zu sagen pflegte,<sup>96</sup> aber mehr mit dem Wunsch zu finden als mit dem Wunsch zu suchen.

Die letzte Erklärungsstrategie ist das alte Adagio der *imitatio naturae*: Wo die mathematischen Aspekte den meisten unzugänglich und die Integralrechnung den *calculatores* überlassen blieb, hoben die einen diese, die anderen jene mechanischen Vorstellungen aufs Schild.<sup>97</sup> In dieser „Freizone“ konnte man sich auf gemeinsame Elemente verständigen: so wurden Kuppeln mit Apfelsinen oder Eiern verglichen<sup>98</sup> und Tonnengewölbe mit der Rinde eines Baumes. Hinter manchen Vergleichen steckte eine kluge experimentelle Anschauung: man denke zum Beispiel an die Analogien Kuppel – Schädel oder Herzmuskel – Ringanker, die der intensiven Zusammenarbeit zwischen Poleni und dem bekannten Pathologen Giovanni Battista Morgagni entstammen. Andere Vergleiche aber scheinen gezielt und ausschließlich der Anregung der Phantasie zu dienen. Man gelangte so zu Formen eines neuen mechanischen Anthropomorphismus, dessen Beispiele ein noch unerforschtes Feld darstellen.

Es handelt sich um vermeintlich simple Analogien, die im Laufe des 19. Jahrhunderts Bestandteil eines Repertoires der *Mécanique pour le peuple* wurden. Dieses fand vor allem unter den Ingenieuren und Architekten große Verfechter und spielte eine unverzichtbare Rolle in der Vermittlung zwischen Experten und Publikum. Diejenigen, die zwischen dem 18. und 19. Jahrhundert jene „Abbildungen des Verborgenen“ schufen, verstanden von der Gewölbemechanik nicht viel mehr als ein guter Architekt des 17. Jahrhunderts. Aber sie hatten gelernt, den Blick nicht nur auf die Form und die Farbe der Architektur, sondern auch auf ihre Mechanik zu lenken.

Das mechanische Alphabet, das Christopher Polhem aus kleinen Holzstückchen zusammenstellte, ging (passender oder unpassender Weise) in die Architekturdebatte ein und verwandelte Bögen, Gewölbe und Kuppeln in Maschinen, die sich für eine Berechnung eignen. Letztendlich stellte sich dieser neue „mechanische“ Weg aber als viel komplizierter heraus als zunächst gedacht – über das mechanische Verhalten der Brunelleschi-Kuppel von S. Maria del Fiore streiten sich die Experten heute noch. Zudem stellte der Gedanke, dass eine Kuppel eine Maschine sei, bei genauerer Betrachtung keine große Neuheit dar. Bereits Giorgio Vasari definierte sie als solche, und im 16. Jahrhundert war der Maschinen-Vergleich gängig. Damals fehlte aber offensichtlich noch ein breites Publikum, das sich mit Mechanik beschäftigte. Die Mechanik war bereits vorhanden, es war allerdings noch nicht *romancée*.

Die *Leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines* (1826) von Louis Navier sind, wie auch die Werke von Gabriel Lamé, Adhémar-Jean-Claude Barré de Saint-Venant und Maurice Lévy, Ausdruck einer anspruchsvollen spekulativen Mechanik im Dienst der *science des ingénieurs*, in der die Elastizitätstheorie eine Führungsrolle übernahm. Diese Disziplin schöpfte das mathematische Handwerkszeug voll aus, immer stringenter durchgeführte Experimentalprogramme erlaubten es, das mechanische Verhalten verschiedener Materialien detailliert zu beschreiben. Besonders angemessen waren diese Verfahren für die statische

<sup>96</sup>Gabrieli 1996, 198.

<sup>97</sup>Vgl. Becchi 2006.

<sup>98</sup>Bereits Plinius, in seiner *Historia naturalis*, hatte deren wunderbare Widerstandsfähigkeit gepriesen, vgl. Plinius Secundus 1832.

Analyse der neuen Eisenkonstruktionen, die zunehmend die traditionellen Mauerwerkskonstruktionen ablösten. Eisenbauten mit großer Spannweite wie Dachkonstruktionen und Brücken repräsentierten ein neues Verständnis der Beziehung von Mechanik und Architektur. Hatte sich die Baustatik zunächst darauf beschränkt, ein Projekt in allgemeiner Form zu begleiten oder (zuweilen widersprüchliche) Lesarten für die statische Verifizierung bereits bestehender Bauwerke zu liefern, so prägten nun die Rechenoperationen selbst den Entwurf und erlaubten verlässliche Vorhersagen des mechanischen Verhaltens der zu realisierenden Konstruktion. Trotz der unvermeidlichen Rückschläge im Bauprozess, zuweilen begleitet von spektakulären Einstürzen (z. B. aufgrund noch unzureichender Kenntnisse der Phänomene der Materialermüdung), erkämpfte sich der strukturelle Entwurf eine zunehmende Autonomie. Zum Symbol der neuen Ingenieurskunst, die in Fachwerkstrukturen eine perfekte Wechselwirkung von Rechenschema und gebauter Konstruktion zum Ausdruck gebracht sah, wurde schließlich die grafische Statik, eingeleitet u. a. von Jean-Victor Poncelet, präziert von Karl Culmann (1866) und Luigi Cremona (1872). Der *Architektur des Architekten* stellte sich eine *Architektur des Ingenieurs* zur Seite, deren verführerische Einheit von Form und Funktion erheblichen Einfluss auf die Architektur des 20. Jahrhunderts ausüben sollte.

## Danksagung

Ich danke Marcus Popplow für die deutsche Übersetzung des Textes.

## Bibliographie

- Agrippa, C. (1583). *Trattato di Camillo Agrippa Milanese di trasportar la guglia in su la piazza di San Pietro*. Rom: Francesco Zanetti.
- Alberti, L. B. (1485). *De re aedificatoria*. Florenz: Nicolò di Lorenzo Alemanno.
- (1912). *Zehn Bücher über die Baukunst*. Hrsg. von M. Theuer. Wien; Leipzig: Hugo Heller.
- (1966). *L'architettura [De re aedificatoria]*. Testo latino e traduzione a cura di Giovanni Orlandi. Introduzione e note di Paolo Portoghesi. Mailand: Il Polifilo.
- Aristoteles (1936). *Mechanical problems, in Idem, Minor works. With an English translation by W. S. Hett*. London/Cambridge, Mass: W. Heinemann/Harvard University Press.
- Baldi, B. (1590). Descrizione del Palazzo Ducale di Urbino. In: *Versi e prose*. Venedig: Francesco de' Franceschi, 503–573.
- (1612a). *De verborum Vitruvianorum significatione, sive perpetuus in M. Vitruvium Pollionem commentarius*. Augustae Vindelicorum: ad insigne Pinus.
- (1612b). *Scamilli impares Vitruviani, a Bernardino Baldo Urbinate noua ratione explicati (...) Augustae Vindelicorum: ad insigne Pinus*.
- (1621). *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes. Adiecta succincta narratione de autoris vita et scriptis*. Moguntiae: Viduae Ioannis Albini.
- (1724). *Memorie concernenti la città di Urbino*. Roma: Salvioni.
- (1998). *Le vite de' matematici. Edizione annotata e commentata della parte medievale e rinascimentale, a cura di Elio Nenci*. Mailand: Franco Angeli.
- (2010). *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes. Bd. I: Testo latino riveduto e corretto con traduzione italiana a fronte. Bd. II: Edizione anastatica*. Hrsg. von E. Nenci. Mailand: FrancoAngeli.
- Barbaro, D., Hrsg. (1556). *I dieci libri dell'architettura di M. Vitruvio, tradutti et commentati da Monsignor Barbaro*. Venedig: Marcolini.
- (1567a). *I dieci libri dell'architettura di M. Vitruvio tradutti e commentati da Monsignor Barbaro, eletto patriarca d'Aquileggia*. Venedig: F. de' Franceschi & G. Chrieger.
- (1567b). *M. Vitruuii Pollionis De architectura libri decem, cum commentariis Danielis Barbari*. Venedig: apud Franciscum Franciscium Senensem, & Ioan. Crugher Germanum.
- Becchi, A., D. Bertoloni Meli und E. Gamba, Hrsg. (2013). *Guidobaldo del Monte (1545-1607). Theory and Practice of the Mathematical Disciplines from Urbino to Europe*. Berlin: Edition Open Access.

- Becchi, A., H. Rousteau-Chambon und J. Sakarovitch, Hrsg. (2013). *Philippe de La Hire entre architecture et sciences*. Paris: Picard.
- Becchi, A. (1999). Between ‚natural‘ and structural mechanics. In: *Applied Mechanics in the Americas*. Hrsg. von D. Pamplona. VI. Philadelphia/Rio de Janeiro: American Academy of Mechanics/Brazilian Society of Mechanical Sciences, 507–510.
- (2002). Chambre H. Per una storia del costruire. In: *Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia*. Hrsg. von A. Becchi und F. Foce. Venedig: Marsilio, 19–127.
- (2004). *Q. XVI. Leonardo, Galileo e il caso Baldi: Magonza, 26 Marzo 1621*. Venedig: Marsilio.
- (2005). Vaults in the Air: Signor Fabritio’s English Theory. In: *Essays in the history of the theory of structures*. Hrsg. von S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 45–49.
- (2006). Eggs, turnips and chains: rhetoric and rhetoricians of architecture. In: *Practice and Science in Early Modern Italian Building. Towards an Epistemic History of Architecture*. Hrsg. von H. Schlimme. Mailand: Electa, 97–112.
- (2008a). „Taccia dunque la turba de gli Architetti pratici ...“. Henry Wotton und der Abt von Guastalla. In: *Wissensformen*. Hrsg. von W. Oechslin. Zürich: gta-Verlag, 100–107.
- (2008b). Imaginer l’entasis. Constructions, définitions, malentendus dans les traités de la Renaissance. In: *La colonne. Nouvelle histoire de la construction*. Hrsg. von R. Gargiani. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 149–163.
- (2008c). Les paradoxes (historiographiques) de la vis columnarum. In: *La colonne. Nouvelle histoire de la construction*. Hrsg. von R. Gargiani. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 203–219.
- (2009). Juxta textum Vitruvii et mentem Newtonii. Das neue Wissen und das „Räthsel der Architektur“. In: *Architekt und/versus Baumeister*. Hrsg. von W. Oechslin. Zürich: gta Verlag, 40–49.
- (2010). La doppia vita di una ‚mauvaise règle‘. La regola di Derand tra Leon Battista Alberti e Simone Stratico. In: *Geometry and Proportion in Structural Design. Essays in Ricardo Aroca’s Honour*. Hrsg. von P. Cassinello, S. Huerta, J.M. de Prada Poole und R. Sánchez Lampreave. Madrid: Ed. Lampreave, 123–139.
- (2011). Cantieri d’inchiostrò. Meccanica teorica e meccanica chirurgica nella seconda metà del Cinquecento. In: *Studi su Domenico Fontana*. Hrsg. von G. Curcio, N. Navone und S. Villari. Mendrisio: Mendrisio Academy Press, Silvana Editoriale, 91–103.
- (2013a). „...zoticamente non intendendo le Mechaniche“. La scientia aedificandi ai tempi di Guidobaldo del Monte. In: *Guidobaldo del Monte (1545-1607). Theory and Practice of the Mathematical Disciplines from Urbino to Europe*. Hrsg. von A. Becchi, D. Bertoloni Meli und E. Gamba. Berlin: Edition Open Access, 241–263.
- (2013b). Idées manuscrites, théories imprimées: la mécanique architecturale de Philippe de La Hire. In: *Philippe de La Hire entre architecture et sciences*. Hrsg. von A. Becchi, H. Rousteau-Chambon und J. Sakarovitch. Paris: Picard, 177–190.
- (2013c). Archimedes’ Bath. In: *Archimedes. The Art and Science of Invention*. Hrsg. von G. Di Pasquale und C. Parisi Presicce. Florenz: Giunti, 115–119.
- Bedon, A. (1983). Il „Vitruvio“ di Giovan Antonio Rusconi. *Ricerche di Storia dell’Arte*:84–90.
- (1996). *Giovan Antonio Rusconi: Illustratore di Vitruvio, artista, ingegnere, architetto*. Vicenza: Centro Internazionale di Architettura Andrea Palladio.
- Benvenuto, E. (1991). *An Introduction to the History of Structural Mechanics*. New York, Berlin: Springer.
- Bernini, D. (2002). Bernardino Baldi e il Palazzo Ducale di Urbino. *Accademia Raffaello. Atti e Studi*( 1):58–79.
- Birch, T. (1756). *The History of the Royal Society of London for Improving of Natural Knowledge ...* Bd. 2. London: A. Millar.
- Bolton, A. und H. H. Duncan (1942). *The City churches [...] and the five tracts on architecture by Sir Chr. Wren. Drawings, engravings, photographs*. Printed for the Wren Society. Oxford University Press.
- Calegari, G. (2004). Palazzo Mamiani Della Rovere: indagini e scoperte. In: *Palazzo Gradari già Palazzo Mamiani Della Rovere. Indagini e scoperte dopo il restauro*. Hrsg. von D. Trebbi, S. Bruscia, A. Nori und G. Calegari. Ancona: Futura Officine Grafiche, 113–140.
- Campori, G. (1855). *Gli artisti italiani e stranieri negli Stati Estensi*. Modena: Tip. Della R.D. Camera.
- Coulomb, C. A. (1773). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l’architecture. *Mémoires de mathématique & de physique, présentés à l’Académie Royale des Sciences par divers savans* 7:343–382.
- Cremona, L. (1872). *Le figure reciproche nella statica grafica*. Mailand: Hoepli.
- Crescimbeni, G. M. (2001). *La vita di Bernardino Baldi, Abate di Guastalla*. Urbino: a cura di Ilaria Filograsso, QuattroVenti.
- Culmann, K. (1866). *Die graphische Statik*. Zürich: Meyer & Zeller.

- Daniello, B. (1568). *Dante con l'espositione di M. Bernardino Daniello da Lucca, sopra la sua Comedia dell'Inferno, del Purgatorio, & del Paradiso; nouamente stampato & posto in luce....* Venedig: Pietro da Fino.
- Danyzy, A. A. H. (1778). Méthode générale pour déterminer la résistance qu'il faut opposer à la poussée des voûtes. In: *Histoire de la Société Royale des Sciences établie à Montpellier*. Languedoc: Jean Martel Ainé.
- Dee, J. (1570). Brief an den Leser. In: *Libro del modo di dividere le superficie attribuito a Machometo Bagdedino. Mandato in luce la prima volta da M. Giovanni Dee da Londra, e da M. Federico Commandino da Urbino [...]*. Pesaro: Girolamo Concordia.
- de Guevara, G. (1627). *Ioannis de Guevara Cler. Reg. Min in Aristotelis Mechanicas Commentarij: una cum additionibus quibusdam Ad eandem materiam pertinentibus*. Roma: Iacobum Mascardum,
- del Monte, G. (1581). *Le mechaniche (...)* tradotte in volgare dal Sig. Filippo Pigafetta. Venetia: appresso Francesco di Franceschi Sanese.
- Derand, F. (1643). *L'Architecture des voûtes, ou l'art des traits et coupe des voûtes ...*, par François Derand. Paris: S. Cramoisy.
- Diderot, D. und J. d'Alembert (1778). *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. A. Genève: chez Pellet.
- Duhem, P. (1906). *Les origines de la statique*. Paris: Hermann.
- (1906–1913). *Études sur Léonard de Vinci: ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu*. Paris: Hermann.
- Engel, H. (2006). *Dantes Inferno. Zur Geschichte der Höllenvermessung und des Höllentrichtermotivs*. München-Berlin: Deutscher Kunstverlag.
- Euklid (1570). *The Elements of Geometrie*. London: Daye, I.
- (1572). *Euclidis Elementorum Libri XV. Unà cum Scholijs antiquis. À Federico Commandino Urbinate nuper in Latinum conversi commentariisque quibusdam illustrati*. Pisauri: Iacobus.
- Evelyn, J. (1664). *An Account of Architects and Architecture, together with An Historical, and Etymological Explanation of certain Terms particularly affected by Architects, in Roland Fréart Sieur de Chambray, A Parallel of the Antient Architecture with the Modern [...]*. London: Tho Roycroft.
- Fontana, C. (1694). *Templum Vaticanum et ipsius origo*. Rom: Buagni.
- Fontana, D. (1590). *Della Trasportatione dell'Obelisco Vaticano (...)*. Roma: Domenico Basa.
- (1979). *Della Trasportatione dell'Obelisco Vaticano, a cura di Adriano Carugo, con un'introduzione di Paolo Portoghesi*. Mailand: Il Polifilo.
- Forest de Bélidor, B. (1729). *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*. Paris: C.-A. Jombert.
- Frézier, A.-F. (1737–1739). *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois pour la construction des voûtes, et autres parties des bâtiments civils et militaires, ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture (...)* par Frézier. Bd. 1, J.-D. Doulsseker fils, Strasbourg/L.-H. Guérin aîné, Paris 1737; Bd. 2, J.-D. Doulsseker fils, Strasbourg/C.-A. Jombert, Paris 1738; Bd. 3, J.-D. Doulsseker fils, Strasbourg / C.-A. Jombert, Paris 1739.
- Gabrieli, G. (1996). *Il carteggio Linceo*. Roma: Accademia nazionale dei Lincei.
- Galilei (1638). *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica et i movimenti locali*. Leiden: Elsevirii.
- (1968). *Le opere*. Florenz: Barbera.
- Gerhardt, C. I. (1855). *Leibnizens mathematische Schriften*. Bd. 3. Halle: H.W. Schmidt.
- Giambullari, P. (1544). *De l'Sito, Forma, e Misure, dello Inferno di Dante*. Florenz: Neri Dortelata.
- (1551). *Lezioni di M. Pierfrancesco Giambullari, lette nella Accademia fiorentina*. Florenz: Lorenzo Torrentino.
- Girard, P.-S. (1798). *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance, auquel on a joint une suite de nouvelles expériences sur la force et l'élasticité spécifiques des bois de chêne et de sapin*. Paris: Didot.
- Gregory, D. (1697). *Catenaria*. Ad Reverendum Virum D. Henricum Aldrich S.T.P. Decanum Aedis Christi Oxoniae. *Philosophical Transactions* 19:637–652.
- Hevelius, J. (1673). *Machinae coelestis pars prior: organographiam, sive instrumentorum astronomicorum omnium, quibus auctor hactenus sidera rimatus, ac dimensus est, accuratam delineationem et descriptionem (...)* exhibens. Gedani: Simon Reiniger.
- Heyman, J. (1998). Hooke's Cubico-Parabohical Conoid. *Notes and Records of the Royal Society of London* 1(52): 39–50.
- Hooke, R. (1676). *A Description of Helioscopes and Some Other Instruments*. London: Martyn.
- La Hire, P. (1690). *Traité de la coupe des pierres*.

- (1692). *Remarques sur l'épaisseur qu'on doit donner aux pieds droits des voutes et aux murs des dômes ou voutes de four*. Manuskript, Procès-verbaux de l'Académie Royale d'Architecture, 27. Oktober 1692; Transkription in (Lemonnier 1911–1929, Bd. 2, S. 345–349). Paris: Archiv des Institut de France.
- (1695). *Traité de mécanique, où l'on explique tout ce qui est nécessaire dans la pratique des Arts, et les propriétés des corps pesants lesquelles ont eu plus grand usage dans la Physique*. Paris: Imprimerie Royale.
- (1698). *Architecture civile*. Manuskript 725. London: RIBA Library.
- (1711). *Règle générale pour déterminer la largeur de la face des piédroits des arcs, lesquels puissent résister à l'effort avec lequel l'arc les escarte, ce qu'on appelle l'effort de la poussée sur la hauteur donnée de ses piédroits*. Manuskript, Procès-verbaux de l'Académie Royale d'Architecture. Paris: Archiv des Institut de France.
- (1712). Sur la construction des voûtes dans les édifices. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*:69–77.
- Lemonnier, H. (1911–1929). *Procès-verbaux de l'Académie Royale d'Architecture (1671–1793)*. Bd. 1 (1671–1681), Paris, J. Schemit 1911; Bd. 2 (1682–1696), Paris: J. Schemit 1912; Bd. 3 (1697–1711), Paris, E. Champion 1913; Bd. 4 (1712–1726), Paris, E. Champion 1915; Bd. 5 (1727–1743), Paris, E. Champion 1918; Bd. 6 (1744–1758), Paris, E. Champion 1920; Bd. 7 (1759–1767), Paris, A. Colin 1922; Bd. 8 (1768–1779), Paris, A. Colin 1924; Bd. 9 (1780–1793), Paris, A. Colin 1926; Bd. 10 (Table générale, Hrsg. M.W. Viennot), Paris: A. Colin 1929.
- Lévy-Leblond, J.-M. (2006). Galilée dans l'Enfer de Dante. In: *La vitesse de l'ombre. Aux limites de la science*. Paris: Éditions du Seuil, 80–85.
- Lohr, C. H. (1974). Renaissance Latin Aristotle Commentaries: Authors A-B. *Studies in the Renaissance* 21:228–289.
- (1975–1982). Renaissance Latin Aristotle Commentaries: Authors C. Authors D-F. Authors G-K. Authors L-M. Authors N-Ph. Authors Pi-Sm. Authors So-Z. *Renaissance Quarterly* Bd. 28 (1975), S. 689–741; Bd. 29 (1976), S. 714–745; Bd. 30 (1977), S. 681–741; Bd. 31 (1978), S. 532–603; Bd. 32 (1979), S. 529–580; Bd. 33 (1980), S. 623–734; Bd. 35 (1982), S. 164–256.
- Malke, L.S. (2000). *Dantes Göttliche Komödie. Drucke und Illustrationen aus sechs Jahrhunderten*. Berlin: Kunstbibliothek-Staatliche Museen Berlin.
- Mercati, M. (1589). *De gli obelischi di Roma*. Roma: Domenico Basa.
- Mögling, D. (1629). *Mechanischer Kunst-Kammer Erster Theil (...)*. Frankfurt am Main: Merian.
- Monte, Guidobaldo del (1577). *Mechanicorum liber*. Pisauri: H. Concordiam.
- (1588). *In duos Archimedis aequponderantium libros paraphrasis scholij illustrata*. Pisauri: H. Concordiam.
- (1592). *Meditatiunculæ Guidi Ubaldi [...]*. Paris, MS Lat. 10246: Bibliothèque Nationale de France.
- Narducci, Enrico (1886). Vite inedite di Matematici Italiani scritte da Bernardino Baldi. *Bullettino di Bibliografia e di Storia delle Scienze Matematiche e Fisiche* XIX:464–473.
- Navier, L. (1826). *Résumé des leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*. Paris: F. Didot père et fils.
- Neumeyer, Fritz (2002). *Quellentexte zur Architekturtheorie*. München/London/New York: Prestel.
- Nix, L. und W. Schmidt (1900). Heron von Alexandria, Mechanik und Katoptrik, in: *Heronis Alexandrini opera quæ svpersvnt omnia*. Hrsg. von G. Schmidt. II. Leipzig: Teubner.
- Oechslin, W. (2002). Philosophemur: Zu Henry Wottons Elements of Architecture (1624). In: *Lezioni di metodo. Studi in onore di Lionello Puppi*. Hrsg. von L. Olivato. Vicenza: Terra Ferma, 251–270.
- Palladio, A. (1570). *I quattro libri dell'architettura*. Venetia: Dominico de' Franceschi.
- Pappus (1588). *Pappi Alexandrini mathematicae collectiones (...)*. Pisauri: H. Concordiam.
- Peterson, M.A. (2002). Galileo's Discovery of Scaling Laws. *American Journal of Physics* 70(6).
- Piasentin, M. (1978–1979). *Giovan Antonio Rusconi*. Magisterarb. Venedig: IUAV.
- Pigafetta, F. (1586). *Discorso di M. Filippo Pigafetta d'intorno all'istoria della Aguglia & alla ragione del muoverla*. Roma: Bartolomeo Grassi.
- Piranesi, Francesco (1780). *Raccolta de' Tempj Antichi. Opera di Francesco Piranesi Architetto Romano*. Presso l'Autore.
- Plinius Secundus, Caius (1832). *Historia naturalis ex recensione I. Harduini et recentiorum adnotationibus*. VIII. Augustae Taurinorum: Pomba.
- Poinsont, L. (1877). *Éléments de Statique*. XII. Aufl. Paris.
- Poleni, G. (1748). *Memorie storiche della gran cupola del Tempio Vaticano (...)*. Padua: Stamperia del Seminario.
- Prinz, W. (1983). Informazione di Filippo Pigafetta al Serenissimo di Toscana per una stanza da piantare lo studio di architettura militare. In: *Gli Uffizi. Quattro secoli di una galleria*. Hrsg. von P. Barocchi und G. Ragionieri. Florenz: Olschki, 343–353.

- Renn, J. und P. Damerow (2010). *Guidobaldo del Monte's Mechanicorum liber*. Berlin: Edition Open Access.
- (2012). *The Equilibrium Controversy: Guidobaldo del Monte's Critical Notes on the Mechanics of Jordanus and Benedetti and their Historical and Conceptual Background*. Berlin: Edition Open Access.
- Robinson, H. W. und W. Adams (1935). *The Diary of Robert Hooke, 1672–1680 (...)*. London: Taylor und Francis.
- Ronchini, A. (1873). *Lettere di Bernardino Baldi cavate dagli autografi che sono a Parma nell'Archivio di Stato*. Parma: R. Deputazione di Storia Patria.
- Rondelet, J.-B. (1802–1817). *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: J.-B. Rondelet.
- Rose, P.L. und S. Drake (1971). The Pseudo-Aristotelian Questions of Mechanics in Renaissance Culture. *Studies in the Renaissance* 18:65–104.
- Rusconi, G. A. (1590). *Della architettura di Gio. Antonio Rusconi*. Venedig: Gioliti.
- Scamozzi, V. (1615). *Dell'idea della architettura universale*. Venetiis: Scamozzi.
- Schöller, W. (1993). *Die Académie royale d'architecture, 1671–1793. Anatomie einer Institution*. Köln: Böhlau-Verlag.
- Serrai, A. (2002). *Bernardino Baldi. La vita, le opere. La biblioteca*. Mailand: Bonnard.
- Settle, T. B. (2001). Experimental sense in Galileo's early works and its likely sources. In: *Largo campo di filosofare. Eurosymposium Galileo 2001*. Hrsg. von J. Montesinos und C. Solís. La Orotava: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 831–849.
- (2002). Dante, the Inferno and Galileo. In: *Pictorial means in early modern engineering, 1400–1650*. Hrsg. von W. Lefèvre. Berlin: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint 93, 139–157.
- Shute, J. (1563). *The First and Chief Groundes of Architecture*. London: T. Marshe.
- Silberschlag, J. E. (1786). *Ausführlichere Abhandlung der Hydraulik des Wasserbaues, Teil II*. Wien: Johann Thomas Edlen von Trattern.
- Smith, L. P. (1907). *The Life and Letters of Sir Henry Wotton*. Oxford: Clarendon Press.
- Soo, L. M. (1998). *Wren's 'Tracts' on Architecture and other Writings*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stirling, J. (1717). Methodus disponendi quocunque Sphaeras in Fornicem. Et inde Demonstratur Proprietas praecipua Curvae Catenariae. In: *Lineae Tertii Ordinis Neutonianae, sive Illustratio Tractatus D. Neutoni De Enumeratione Linearum Tertii Ordinis. [...]*. Hrsg. von J. Stirling. Oxoniae: E Theatro Sheldoniano, Impensis Eduardi Whistler Bibliopolae Oxoniensis, 11–14.
- Strano, G. (2008). *Il telescopio di Galileo. Lo strumento che ha cambiato il mondo*. Florenz: Giunti.
- Tartaglia, Niccolò (1546). *Quesiti e inventioni diverse*. Venetia.
- Tassora, R. (2001). *Le Meditatiunculae de rebus mathematicis di Guidobaldo del Monte*. Diss. Università di Bari.
- Truesdell, Clifford Ambrose (1960). *The Rational Mechanics of flexible or elastic bodies 1638–1788. Introduction to L. Eulerii Opera Omnia*. II. II. Basel: Birkhäuser.
- Vitruv (1488). *De architectura libri decem*. Roma.
- Waller, R. (1705). The Life of Dr. Robert Hooke. In: *The Posthumous Works of Robert Hooke....* Hrsg. von R. Waller. London: S. Smith und B. Walford, I–XXVIII.
- Wotton, H. (1624). *Elements of Architecture. Collected by Henry Wotton Knight, from the Best Authors and Examples*. London: I. Bill.
- (1968). *The Elements of Architecture. A Facsimile Reprint in the First Edition (London, 1624)*. Charlottesville: University Press of Virginia.
- Wren, S. (1750). *Parentalia or, Memoirs of the Family of the Wrens*. London: T. Osborn und R. Dodsley.
- Yates, Frances (1969). *Theatre of the World*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Zorzi, G. (1956–1957). Altre due perizie inedite per il restauro del Palazzo Ducale di Venezia dopo l'incendio del 20 Dicembre 1577. *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* 115:169–170.