

**Candide—
Journal for Architectural
Knowledge**

You have downloaded following article/
Sie haben folgenden Artikel heruntergeladen:

Title (English): A Machine Epistemology in Architecture. Encapsulated Knowledge and the Instrumentation of Design
Titel (deutsch): Epistemologie der Maschine in der Architektur. Maschinengespeichertes Wissen und die Instrumentalisierung des Entwurfs

Author(s)/Autor(en): Andrew J. Witt

Translator(s)/Übersetzer: Annette Wiethüchter

Source: *Candide. Journal for Architectural Knowledge* No. 03 (12/2010), pp. 37–88.

Published by: Transcript Verlag, Bielefeld, on behalf of *Candide*.

Stable URL: tbc

The content of this article is provided free of charge for your use. All rights to this article remain with the authors. No part of the article may be reproduced in any form without the written consent of the author(s) and *Candide. Journal for Architectural Knowledge*.

For further details, please see www.candidejournal.net.

A Machine Epistemology in Architecture

Encapsulated Knowledge and the Instrumentation of Design

Contemporary architecture is preoccupied with radical formal experimentation, enabled in particular by the computer and computer-controlled machines. Such ambitious architectural form-making requires a virtuosic mastery of spatial geometry, a specific kind of design knowledge that is often specialized and difficult to deploy. Machines, including computers, provide a way of encapsulating this knowledge in a more usable and repeatable way. Such machines raise certain epistemic challenges: they abstract systems and detach the user from operative logic, requiring more instrumental and less design knowledge from the user. While contemporary architects are increasingly testing the relationship of design knowledge to instrumental knowledge, we may draw lessons from the broad use of mechanical drawing instruments for design and design-based computation in the nineteenth century. In this historical context we can see key relationships between instrumental knowledge and design knowledge that are fundamental to understanding our own increasingly mechanized approach to contemporary design.

Epistemologie der Maschine in der Architektur Maschinengespeichertes Wissen und die Instrumentalisierung des Entwurfs

Die zeitgenössische Architektur ist geprägt von radikalen, formalen Experimenten, die vor allem durch Computerprogramme und computergesteuerte Maschinen möglich geworden sind. Diese anspruchsvolle Art der architektonischen Formgebung erfordert die Meisterung der Berechnung räumlicher Geometrien – das heißt ein Entwurfswissen, das vielfach hoch spezialisiert ist und besondere Schwierigkeiten bei der Umsetzung bereitet. Maschinen, einschließlich Computer, bieten die Möglichkeit, dieses Wissen auf anwenderfreundliche, wiederholt abrufbare Art und Weise zu speichern. Derartige Maschinen stellen den Benutzer vor bestimmte erkenntnistheoretische Herausforderungen, indem sie die der Maschine zugrunde liegenden Systeme abstrahieren und den Benutzer von ihrer operativen Logik trennen. Sie erfordern folglich mehr Instrumenten- und weniger Entwurfswissen. Während Architekten heute zunehmend die Beziehung zwischen Entwurfswissen und Instrumentenwissen ausloten, lassen sich aus den im 19. Jahrhundert üblichen, als Entwurfs- und Berechnungshilfen genutzten mechanischen Zeichenmaschinen etliche Lehren ziehen. Im historischen Kontext können wir zentrale Bezüge zwischen Instrumentenwissen einerseits und Entwurfswissen andererseits erkennen, welche die Grundlagen für ein Verständnis unseres heutigen, zunehmend mechanisierten Entwerfens bilden.

A Contemporary Polemic, A Historic Analog

For the last several years we have found ourselves in a design context deeply preoccupied by the formal possibilities of design technology, particularly the computer. Once the purview of experimentalists, design computation has become one of the most vital strains within contemporary practice. By allowing the automation of complex processes and the rule-based means to resolve challenging problems of geometry, economy, representation, and construction, the computer acts as an instrument that extends the capacity and ability of the architect to manage problems and forms that would not be possible otherwise. By scripting and programming software, architects can even have the computer carry out complex custom calculations of their own invention, essentially encapsulating the knowledge and formal volition of the architect within the software itself.¹

Yet architects maintain an ambivalent if not conflicted view of technology in general and the computer in particular. The heroic view of architecture as an autonomous and unmediated manifestation of the will of the architect still holds public and private fascination. Even technical innovators may duly defer to this self-characterization of architecture, and are often at pains to characterize their work as design as opposed to engineering, which has become a pejorative term. The advent of a technology that is so powerful, fast, automatic, even intelligent, presents a subversive confrontation to the architect's sufficient and autonomous will or knowledge. The perceived association of the computer with striking formalism and tentative material resolution makes it only more suspicious to the traditional understanding of design.²

The appearance of technologies so disruptive to the practice and self-understanding of architecture has implications for the postmodern project of textual, theoretical, and historical autonomy of design. Autonomy

implies an independence of the syntactic and rational systems of architecture from extrinsic technical or ideological constraints.³ It also affirms the role of the architect's will, whose syntactic choices in turn sustain the autonomy project.⁴ This truly autonomous act of will implies a sort of epistemic self-sufficiency: the designer has a specific knowledge to create form, and any instruments that could imply that the designer's knowledge or capacity are incomplete call into doubt this heroic view of architecture and authorship. Thus the disciplinary implications of the computer hinge on questions of knowledge: does the computer, as an intelligent tool, enhance or diminish the knowledge of the architect? Can the computer or software encapsulate knowledge? If yes, can a user be said to know a process that is abstracted, encapsulated, and automated in a machine? Do machines in and of themselves represent a sort of latent knowledge?

At the core of the polemic is an implicit distinction between two types of knowledge: design knowledge and instrumental knowledge. *Design knowledge* is an intrinsic understanding by the architect of formal organization principles such as the relationship of parts to whole, and interrelationships of program constraints, spatial organization, ranges of material effects, and use of geometric methods. It may include disparate and heterogeneous organizational schemes and diagrams.⁵ These general principles may be redeployed in various contexts, and need not be tied to particular working methods or automatic tools. In this sense, *geometric knowledge* is a particular kind of design knowledge: although it may be deductive and procedural, it is not automatic and its application requires a synthetic understanding of design constraints.⁶ Design knowledge is the most enduring epistemic content of architecture as a discipline, sometimes even hastily equated with architectural knowledge itself.

- 1 Aranda/Lasch 2006: 9.
- 2 Mallgrave 2010: 216.
- 3 Wood 2002: 49.
- 4 Wood 2002: 50.
- 5 Kalay/Swerdloff/Maikowski: 50.
- 6 Kalay/Swerdloff/Maikowski: 51.

Zeitgenössischer Disput und historische Analogie

Seit etlichen Jahren sind Architekturdiskurs und -praxis zutiefst von den formalen Möglichkeiten der Entwurfstechnologien, insbesondere des Computers, bestimmt und geprägt. Einst die Domäne experimentell orientierter Architekten und Randfiguren der Disziplin, ist das computergestützte Entwerfen (*design computation*) inzwischen zu einer der vitalsten Bewegungen der zeitgenössischen Architektur avanciert. Indem wir die Automatisierung komplexer Entwurfsprozesse und regelbasierter Entwurfsmittel zugelassen haben, mit denen komplizierte Aufgaben in den Bereichen Geometrie, Wirtschaftlichkeit, Darstellung und Konstruktion gelöst werden, haben wir den Computer zu einem Arbeitsmittel gemacht, das die Kapazität und Fähigkeit des Architekten um ein Vielfaches steigert, so dass er anders nicht lösbare Probleme lösen und anders nicht machbare Formen realisieren kann. Wenn Architekten ihre eigene Computersoftware skripten und programmieren, können sie damit sogar komplizierte Berechnungen nach eigener Erfindung anstellen, wobei das Wissen und die formale Intention des Architekten in der Software abgespeichert – verkapselt – ist.¹

Dennoch haben sich viele Architekten eine ambivalente, wenn nicht gar antipathische Haltung zur Technologie im Allgemeinen und Computertechnik im Besonderen bewahrt. Die heroische Sicht der Architektur als autonomer, direkter Manifestation des Architektenwillens bleibt ein ebenso allgemein verbreitetes wie persönliches Faszinosum. Selbst technische Innovatoren neigen zu dieser Selbstdarstellung des Berufs, und es fällt ihnen schwer, ihre Tätigkeit im Gegensatz zu den Ingenieurwissenschaften (heute fast schon ein Pejorativum) als Entwerfen hervorzuheben. Eine Technologie, die so leistungsstark, schnell, automatisiert, ja sogar intelligent ist, unterläuft und widerlegt jedoch die Behauptung, dass der autonome

Wille und das Fachwissen des Architekten für jeden Entwurf genügen. Die Assoziation des Computers mit exzentrischem Formalismus und unvollständig gelöster baulicher Umsetzung macht ihn umso verdächtiger für alle, die an einer traditionellen Auffassung von Architektur festhalten.²

Die Anwendung derartiger Technologien, welche die Praxis und das Selbstverständnis der Architekten so empfindlich stören, haben Auswirkungen auf das postmoderne Projekt der inhaltlichen, theoretischen und historischen Autonomie des architektonischen Entwurfs. Autonomie impliziert die Unabhängigkeit der syntaktischen und rationalen Architekturordnungen von „artfremden“ technischen oder ideologischen Bedingungen³ und bestätigt auch die Bedeutung der Intention des Architekten, dessen syntaktische Entscheidungen ihrerseits das Autonomieprojekt voranbringen.⁴ Der wahrhaft autonome Willensakt impliziert eine Art epistemologische Selbstgenügsamkeit: Der entwerfende Architekt besitzt spezifisches Fachwissen über Formgestaltung, und jedes Entwurfsinstrument, das darauf hinzudeuten scheint, dass seine Kenntnisse und Kapazitäten nicht ausreichen, stellt die heroische Deutung von Architektur und Autorschaft in Frage. Deshalb sind die fachlichen Auswirkungen des Computers von Fragen des Wissens abhängig – von der Frage, ob der Computer als intelligentes Arbeitsmittel das Wissen des Architekten mehrt oder mindert. Kann ein Rechner beziehungsweise eine Software Wissen verkapseln, das heißt, speichern (*to encapsulate*)? Wenn ja, kann man dann auch behaupten, dass ein Nutzer sämtliche in einer solchen Maschine abstrahierten, gespeicherten und automatisierten Prozesse kennt und versteht? Sind solche Maschinen an und für sich so etwas wie verborgene Quellen des Fachwissens?

Der Kern dieser Polemik besteht in der unausgesprochenen Unterscheidung zwischen zwei Arten von Wissen: Entwurfswissen und

1 Aranda/Lasch 2006: 9.

2 Mallgrave 2010: 216.

3 Wood 2002: 49.

4 Wood 2002: 50.

Instrumental knowledge is a more narrow understanding of the procedures to successfully operate a certain type of technology, which would include ability to operate a software, program, script, process, tool, instrument, or machine to intended effect. This is in contrast to the way the term “instrumental knowledge” is used in the epistemology of science, for example: as a description of theories of predictive reliability (and thus instrumentality).⁷ Instead, in our sense instrumental knowledge is in fact an intentional knowledge of instrument operation. Instrumental knowledge also enables the creation of systems of interrelated technologies intended to facilitate the aims of design. More generally, instrumental knowledge can include the ability to abstract the inverse constraints of these machines onto design with the aim of pre-rationalizing the design itself, as in the case of drawing machines, fabrication machines, or construction machines. This instrumental knowledge is powerful because it makes procedures encapsulated by the technology in question easily accessible, communicable, repeatable, hackable, and transformable.⁸

Architectural knowledge is the combination, in whatever measure or proportion, of design knowledge and instrumental knowledge needed for the intentional practice of architecture. The proportion of this combination, and even the presence or absence of instrumental knowledge in architectural knowledge, becomes the precise problem of the current debate.

Yet the matter at stake is not simply where to draw a particular line in the sand between design knowledge and instrumental knowledge. The machine permeates the relationship between both types of knowledge by being a tool to encapsulate certain operative aspects of design knowledge, including geometric and spatial knowledge. As a result of their fundamental implications for organization knowledge management and productivity, knowledge encapsulation and the reuse of encapsulated knowledge have become key categories in epistemology of economics.⁹ Encapsulation preserves complexity without the user needing explicit

- 7 Boyd 1980: 614.
- 8 Aranda/Lasch 2006: xi.
- 9 Langlois 2001: 77.
- 10 Langlois 2001: 85.
- 11 Lynn 2000: 11.
- 12 Iwamoto 2009: 5.

understanding of all this complexity, and software is the paradigmatic case of such encapsulation.¹⁰ An example of encapsulated knowledge in design, as Greg Lynn has pointed out, is calculus-based mathematics encapsulated in computer software,¹¹ but there are many others. The machine may also encapsulate knowledge not related directly to design—for example, knowledge of the operation of structural or environmental systems, or the knowledge of organizational behavior itself. With the instrumental knowledge of the machine, the user can simulate having the complex knowledge it encapsulates. It is the legitimacy of this simulation and its role in architecture that is ultimately at issue.

These questions of design knowledge and instrumental knowledge with respect to machines directly concern contemporary architects. The use of digital computers for the specification and communication of design and the use of computer-controlled machines for the cutting, forming, and assembling of nonstandard materials and forms is now commonplace.¹² Architects are exploring sophisticated mathematical concepts and material processes through the use of these machines. Increasingly, architects are designing and constructing their own machines toward deliberate design ends, just as they might script their own software. This reinvigorated relationship between architect and machine in both research and practice is placing new importance on instrumental knowledge. Contemporary digital tools continue the trend to abstract and encapsulate knowledge—in particular engineering knowledge—within machines on a new scale, and require new levels of skill and technical virtuosity to operate. Does virtuosic use of these tools form a distinct domain of architectural knowledge?

There are two main camps engaging this debate over the role of instrumental

Instrumentenwissen. *Entwurfswissen* (*design knowledge*) meint gestalterisches Know-how, meint das spezifische Verständnis des Architekten für die Prinzipien formaler Organisation, etwa der Beziehungen zwischen dem Ganzen und seinen Teilen, der Wechselbezüge zwischen bauprogrammatischen Zwängen, Regeln der Raumgliederung, der Materialwirkungen und der angewandten geometrischen Entwurfsmethode. Das kann ganz unterschiedliche Gliederungsschemata und Diagramme umfassen.⁵ Diese Grundprinzipien können in verschiedenen Zusammenhängen eingesetzt werden und sind nicht zwangsläufig von einer bestimmten Arbeitsweise oder von automatisierten Arbeitsmitteln abhängig. In diesem Sinne ist *Geometrie-wissen* eine besondere Form von Entwurfswissen. Es kann deduktiv und verfahrensorientiert sein, ohne jedoch in Automatismus zu münden. Die Anwendung dieses Spezialwissens erfordert das umfassende und zusammenhängende Verständnis sämtlicher Entwurfswänge.⁶ Entwurfswissen stellt den dauerhaftesten epistemologischen Inhalt der Architektur als Fachdisziplin dar und wird gelegentlich vorschnell mit architektonischem Fachwissen als Ganzes gleichgesetzt.

Der Begriff *Instrumentenwissen* (*instrumental knowledge*) bezeichnet das Verständnis der für die erfolgreiche Anwendung einer bestimmten Entwurfsmethode erforderlichen Arbeitsschritte einer bestimmten Technologie, sei es die kompetente Handhabung von Software, Programm, Skript, Instrument oder Maschine, um das beabsichtigte Entwurfsergebnis zu erzielen. Diese Auffassung steht im Gegensatz zur Verwendung des Begriffs in der naturwissenschaftlichen Epistemologie, zum Beispiel zur Beschreibung prädiktiver Zuverlässigkeits- und damit Zweckdienlichkeitstheorien.⁷ Nach unserer Deutung hingegen handelt es sich bei Instrumentenwissen um die intentionale, zielorientierte Kompetenz in der Handhabung der Instrumente. Mit diesem Wissen ist der Architekt in der Lage, Systeme aus mehreren zueinander in Wechselbeziehung stehenden Technologien zu bilden, die dazu geeignet sind, die jeweiligen Entwurfsziele zu erreichen. Allgemeiner gesagt, kann das die

Fähigkeit umfassen, die den Maschinen eigenen wechselseitigen Restriktionen auf den Entwurf zu übertragen, um diesen im Vorfeld zu rationalisieren, wie das bei der Verwendung von Zeichen-, Produktions- oder Konstruktionsmaschinen geschieht. Dieses Instrumentenwissen überzeugt, weil es die im jeweiligen technischen Arbeitsmittel inhärenten Verfahren leicht zugänglich, vermittelbar, wiederholbar, zerlegbar und veränderbar macht.⁸

Architektonisches Wissen kombiniert, egal in welchem Maß oder Maßverhältnis, Entwurfswissen mit dem für eine intentionale Architektentätigkeit erforderlichen Instrumentenwissen. Die Proportionen innerhalb dieser Kombination und selbst das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein von Instrumentenwissen als Teil des Architekturwissens bilden die zentrale Fragestellung der aktuellen Debatte.

Dabei geht es nicht einfach um die Frage, wo genau man die Trennlinie zwischen Entwurfs- und Instrumentenwissen in den Sand zeichnet. Die Maschine durchdringt die Beziehung zwischen beiden Wissensarten als ein Hilfsmittel, das bestimmte operative Aspekte des Entwurfswissens (auch geometrischer und räumlicher Art) speichern oder verkapseln kann. Aufgrund ihrer grundlegenden Rolle im Bereich von Wissensmanagement und Produktivität sind in der Maschine gespeicherte Informationen (*encapsulated knowledge*) und deren Wiederverwendung in der wirtschaftswissenschaftlichen Epistemologie inzwischen zu Schlüsselkategorien avanciert.⁹ Die Speicherung bewahrt Komplexität, ohne dass der Nutzer das Speichersystem genau verstehen muss, und Software stellt den paradigmatischen Fall einer solchen Verkapselung des Wissens dar.¹⁰ Wie Greg Lynn ausgeführt hat, ist die in Computerprogramme eingeflossene, auf Differenzial- und Integralrechnung beruhende Mathematik ein Beispiel für diese Verkapselung von Wissen,

5 Kalay/Swerdloff/Maikowski 1990: 50.

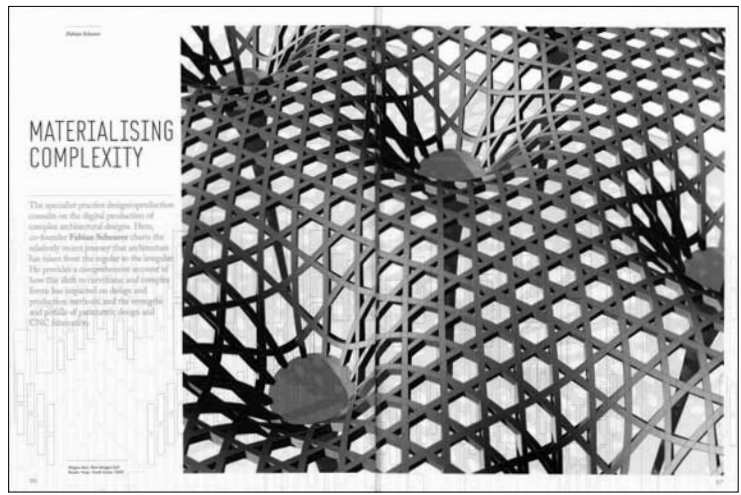
6 Kalay/Swerdloff/Maikowski 1990: 51.

7 Boyd 1980: 614.

8 Aranda/Lasch 2006: XI.

9 Langlois 2001: 77.

10 Langlois 2001: 85.



Schlüsselpositionen zur Rolle des Rechners in der Architektur sind in jüngsten Ausgaben der Zeitschrift *Architectural Design (AD)* debattiert worden. „Exuberance in Architecture“ (März/April 2010, Marjan Colletti, Herausgeber) macht sich eine ekstatische, lyrische, sogar barocke Vorstellung eines anti-technischen Künstlertums zu eigen. „The New Structuralism“ (Juli/August 2010, Rivka und Robert Oxman, Herausgeber) untersucht eine analytischere und bewusst integrative Herangehensweise, auf der Suche nach gemeinsamen Grundlagen für Architekten und Ingenieure. Die beiden Herangehensweisen stehen in etwa für die beiden aktuellen entgegengesetzten Positionen in Bezug auf das Verhältnis von Entwurfswissen zu Instrumentenwissen.

Key positions in architecture and computation have been advanced in recent issues of *Architectural Design (AD)*. “Exuberance in Architecture” (March/April 2010, Marjan Colletti, editor) espouses an ecstatic, lyrical, even baroque notion of techno-skeptical artistry. “The New Structuralism” (July/August 2010, Rivka and Robert Oxman, editors) examines a more analytic and self-consciously integrative approach, seeking common computational frameworks for designers and engineers. The two approaches are broadly representative of two divergent contemporary positions regarding the relationship of design knowledge to instrumental knowledge.

Fig. 1.

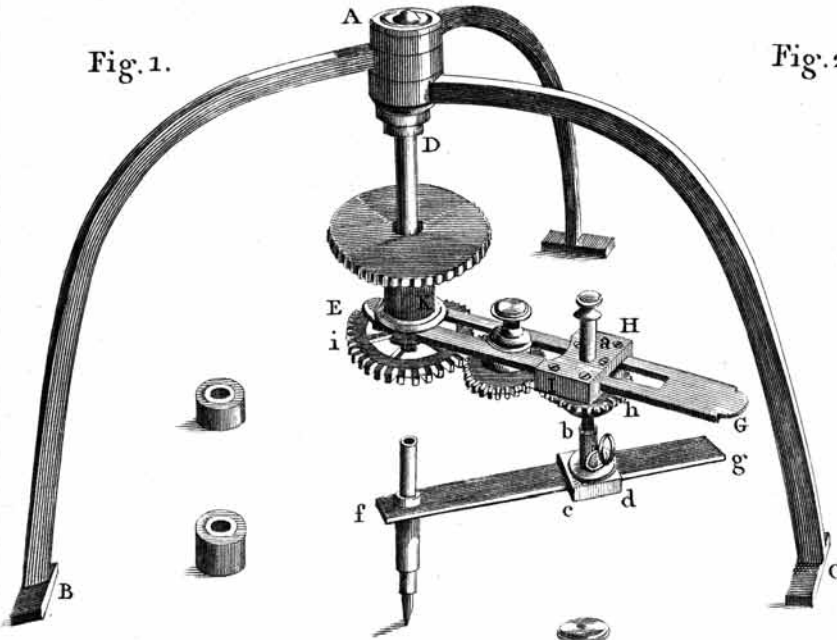


Fig. 2.

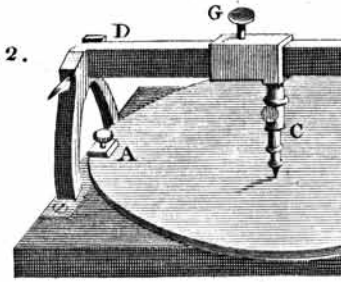


Fig. 2.

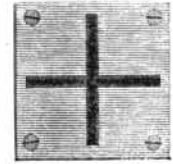


Fig. 5.

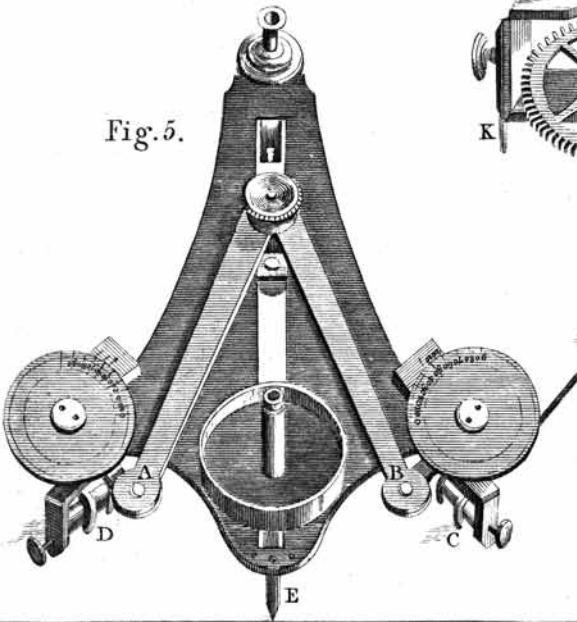


Fig. 6.

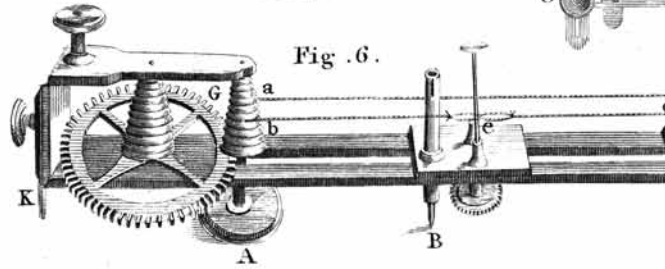


Fig. 6. a.

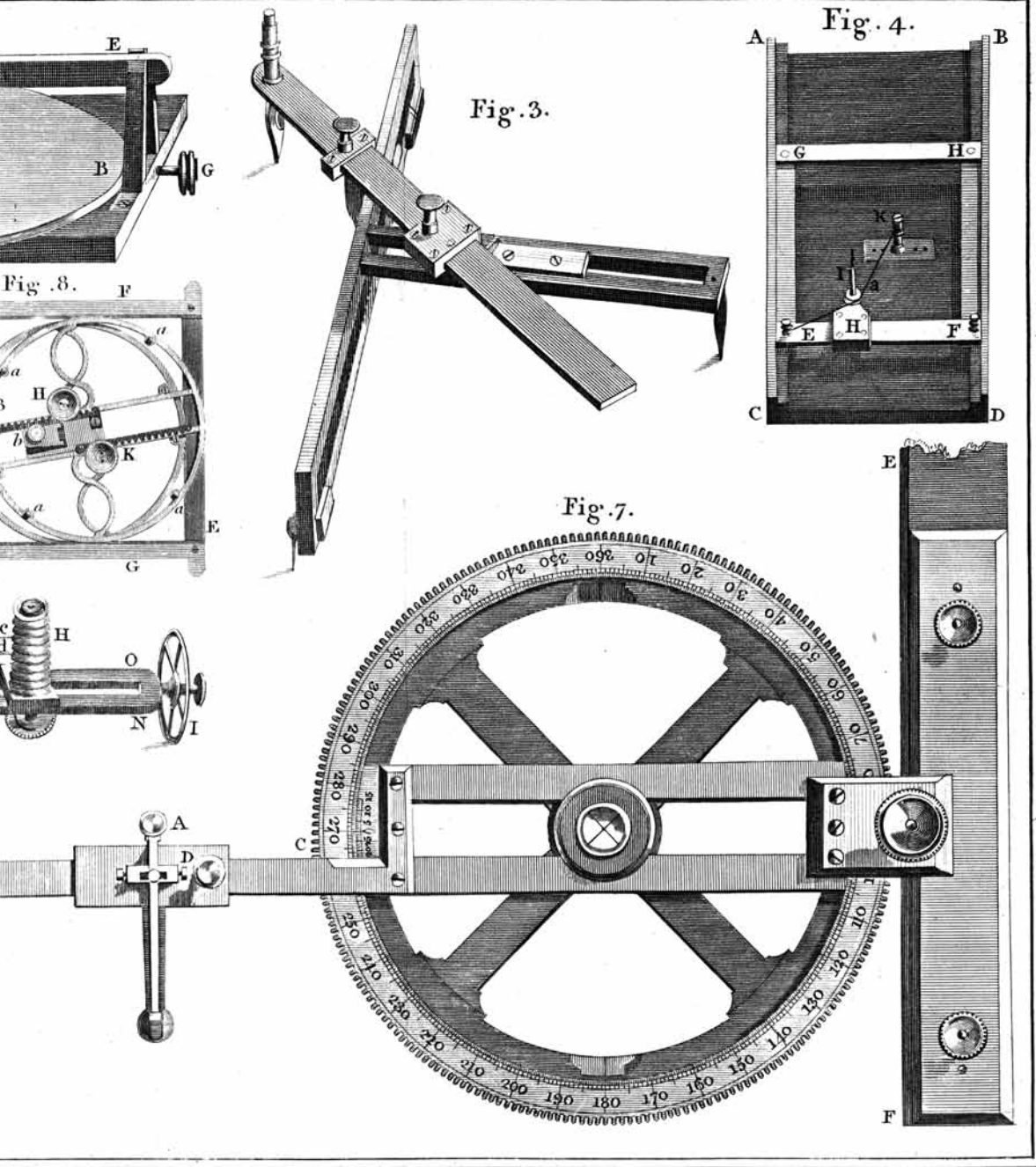


L. Moine Delin.

London, Printed for & Published by W. and S. Jones

Die Konstruktion fortgeschrittener Zeicheninstrumente zur Darstellung komplexer Kurven bildete Ende des 19. Jahrhunderts eine eigenständige Disziplin. Mit seinem Werk *Geometrical and Graphical Essays* (1791) stellte George Adams den Lesern im englischen Sprachraum zum ersten Mal zahlreiche fortschrittliche Zeichengeräte vor. Dazu gehörte

Giambattista Suardis „geometrischer Schreiber“, ein mehrteiliger Zirkel für die Erstellung von Kreisen, Kegeln sowie komplizierten Epizykloiden und Hypozykloiden. Auf der Bildtafel ist dieses Instrument [Abb. 1] neben einfacheren Geräten wie etwa dem Ellipsografen [Abb. 3] zu sehen.

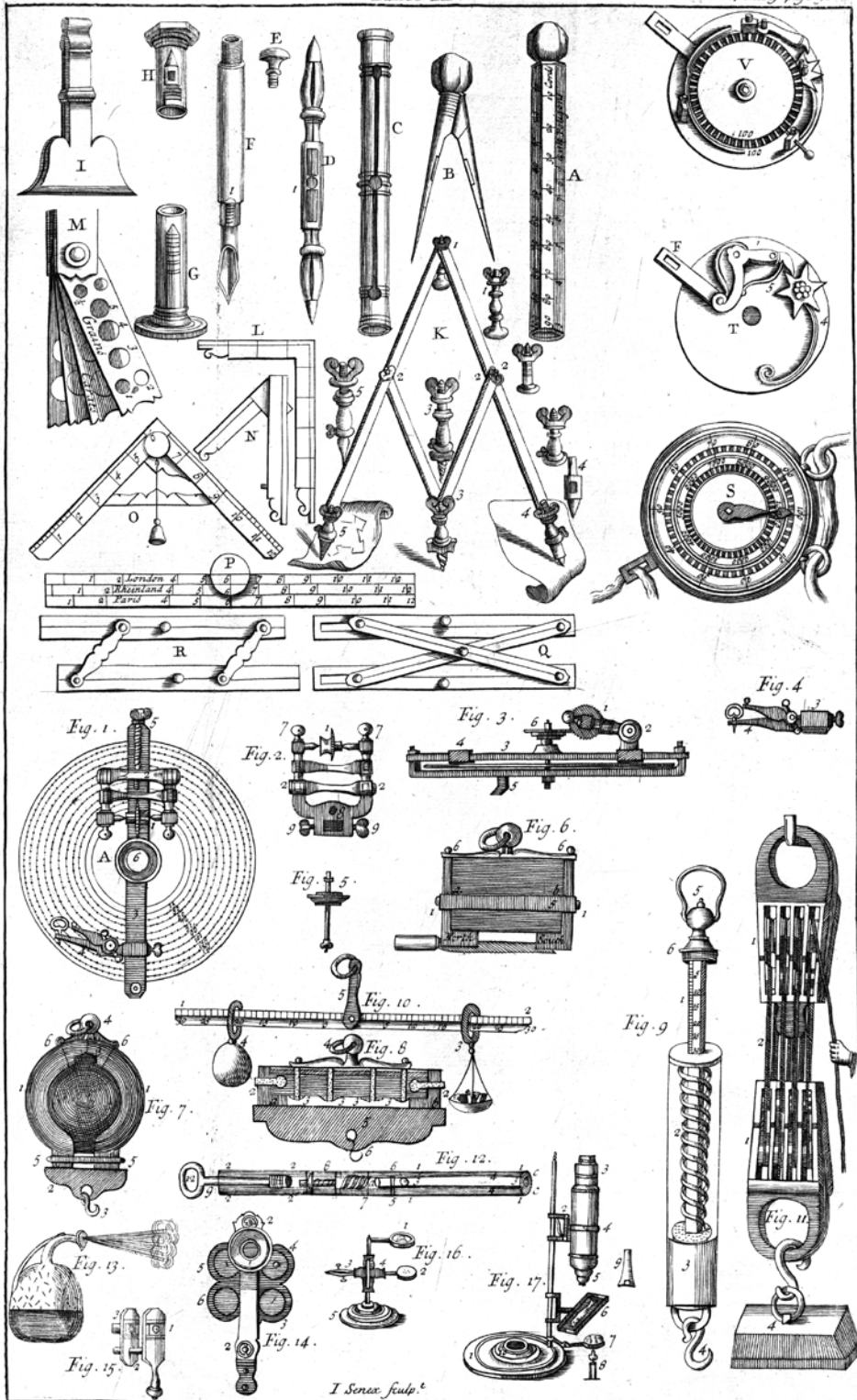


es, 30, Holborn, as the Act directs. June 11791.

J. Lodge sculp

The design of sophisticated instruments for the drawing of complex curves emerged as a discipline in its own right in the latter part of the nineteenth century. George Adams's *Geometrical and Graphical Essays* (1791) introduced many advanced drawing tools to the English-speaking world for the first time. Among them were Giambattista Suardi's geometrical pen,

a compound instrument for the drawing of circles, conics, and more complex epicycles and hypocycles. In the plate, the geometrical pen [figure 1], is placed alongside more prosaic instruments such as the ellipsograph [figure 3].



In seiner Schrift *Traité de la construction et des principaux usages des instruments de mathématiques* (1709) gab Nicolas Bion einen Überblick über die technischen Zeichengeräte des frühen 18. Jahrhunderts.

In his *Traité de la construction et des principaux usages des instruments de mathématiques* (1709), Nicolas Bion provided an overview of the drawing instruments of the early eighteenth century.

knowledge as it relates to the computer in design. A first group sees the new digital formalism, typically associated with complex geometric forms, as a return to a Baroque project deeply connected to a qualitative understanding of design. Terms such as “excess,” “elegance,” and “exuberance” have become the ideological watchwords of this group and its project of formal transcendence and intensity.¹³ This group, while celebrating the design effects of digital virtuosity, maintains a discreet distance between the aesthetic volition of the designer and the instrumental means of its accomplishment. The tendency is rhetorically both anti-technical and anti-epistemic. According to Marjan Colletti, “Neither does exuberance concern the rationalist and epistemological lobby: its barricades crowded and piled high; its manifestos engineering-functional, mathematic-descriptive, and neo-*sachlich*. Against this trend, I bring forth the possibility of an empiricist phenomenological counterpart: *DigitaAlia*—the other digital practice.”¹⁴ There is a certain sanctity concerning the epistemic autonomy of design that prohibits such designers from discussing the underlying technical systems with which they are pragmatically preoccupied but cannot, for the sake of design orthodoxy, fully acknowledge. For this group, design knowledge is the true architectural knowledge, instrumental knowledge merely an expedient.

A second group sees both design knowledge and instrumental knowledge as being reciprocal dimensions of architectural knowledge. This camp sees an array of challenges and opportunities bearing on design as being more comprehensive than form-making alone, extending to professional and practical domains of power and control over design execution. While not connected with a particular formal project, this group sees the critical and technical engagement with form as generative of both design and instrumental knowledge. These designers see no conflict in foregrounding instrumental questions as an object of study. In fact, such questions are essential to the reemerging role of the architect as master builder.¹⁵ To them, the computer is a way to access and

13 Colletti 2010.
14 Colletti 2010: 18.
15 Kieren/Timberlake 2004: xi.
16 Kolarevic 2003: 59.
17 Aranda/Lasch 2006.

use domains of knowledge pragmatically, and to extend and organize the capacity of architects.¹⁶ The computer becomes, in effect, a resource for disciplinary organization. This is apparent, for instance, in architects’ interest in software for structural analysis or environmental simulation, which are sometimes used as proxies for specialist consultants. Beyond these specialized applications, designers can now embed their knowledge of procedures and processes into software through programming, scripting, and rule-based design, essentially transforming design knowledge into instrumental knowledge. Here there is a strong interest in tool making, tinkering, hacking—and a candor that invention should not be limited to engineering.¹⁷ For this group, instrumental knowledge becomes a powerful way to extend design knowledge, architectural knowledge necessarily encompassing both.

While these polemics extend beyond questions of form, the questions that surround form-making and, more particularly, geometric design knowledge in the creation of complex forms, do bring this polemic into clearer relief. Where does the knowledge required to produce such forms reside? Is this knowledge architectural knowledge? What is the epistemic role of the machine in form-making?

This epistemic debate has implications for contemporary architectural practice, but it may be instructive to shift the context of study away from current controversies toward a distinct historical frame, similar to our own in its fascination for the machine as aid to form-making. The notion of machine-encapsulated design knowledge is germane to the period in nineteenth-century Britain and France characterized by the development of drawing machines for complex curves and projective constructions. These machines expanded the formal vocabulary of architecture by encapsulating as mechanical motions and procedures certain

aber längst nicht die einzige.¹¹ Die Maschine kann auch Informationen ohne unmittelbare Relevanz für die Entwurfsarbeit enthalten, zum Beispiel Daten zum Betrieb konstruktiver und ökologischer Systeme oder Auskünfte über Organisationsverhalten. Das Instrumentenwissen der Maschine suggeriert dem Nutzer, er verfüge selbst über das komplexe, in ihr gespeicherte Wissen. Letztlich geht es hier also um die Legitimität dieser Simulation und deren Funktion in der Architektur.

Von diesen Aspekten des Entwurfs- und Instrumentenwissens sind zeitgenössische, maschinenbenutzende Architekten unmittelbar betroffen. Die Nutzung digitaler Rechner für Entwurf, Bau- und Leistungsbeschreibungen sowie deren Übermittlung an andere und die Nutzung rechnergesteuerter Maschinen, mit denen Sondermaterialien und -formen zugeschnitten, geformt und montiert werden, ist heute allgemeine Praxis.¹² Mit Hilfe dieser Maschinen untersuchen Architekten komplexe mathematische Konzepte und physisch-physikalische Prozesse. Zunehmend entwickeln und bauen sie eigene Maschinen oder schreiben selber Programme, um gewisse gestalterische Ziele umsetzen zu können. Diese revitalisierte Beziehung zwischen dem Architekten und der Maschine in Lehre und Praxis steigert die Bedeutung von Instrumentenwissen. Die heutigen digitalen Werkzeuge verstärken den Trend zur Abstraktion und Speicherung von Wissen – insbesondere von ingenieurtechnischem Wissen – in Maschinen, und das in großem Umfang. Betrieb und Anwendung dieser digitalen Maschinen erfordern gründlichere Kenntnisse und mehr technische Virtuosität als die früheren Arbeitsmittel des Architekten. Bildet die virtuose Anwendung dieser Werkzeuge ein eigenständiges Gebiet des Architekturwissens?

In der Debatte über die Rolle des Instrumentenwissens in Bezug zum Computer beim Entwurf zeichnen sich zwei große Lager ab. Das eine Lager sieht den typischerweise mit komplexen geometrischen Formen assoziierten, neuen digitalen Formalismus als Rückkehr zu einem barocken Projekt, das tief in einer auf Qualität zielenden Designauffassung verankert ist. Begriffe wie Über-

steigerung, Eleganz und Überschwang heißen die ideologischen Parolen dieser Gruppe, die formale Transzendenz und Intensität anstrebt.¹³ Während ihre Vertreter die Ergebnisse digitaler Virtuosität preisen, wahren sie diskret den Abstand zwischen der ästhetischen Intention des Entwerfers und den Arbeitsmitteln, mit denen sie verwirklicht wird. Diese Haltung ist rhetorisch sowohl anti-technisch als auch anti-epistemologisch. Laut Marjan Colletti betrifft der Überschwang auch nicht „die Lobby der Rationalisten und Erkenntnistheoretiker. Deren Barrikaden sind umdrängt und hoch aufgetürmt; ihre Manifeste ingenieurtechnisch-funktionalistisch, mathematisch deskriptiv und neo-sachlich. Gegen diesen Trend führe ich die mögliche Existenz eines empirischen phänomenologischen Gegenspielers ins Feld, nämlich *Digitalia* – die andere digitale Praxis.“¹⁴ Die erkenntnistheoretische Autonomie der architektonischen Entwurfsarbeit wird gewissermaßen als unantastbar aufgefasst. Sie verbietet es dem Architekten, die seinem kreativen Tun zugrunde liegenden technischen Systeme zu diskutieren, mit denen er sich in der Praxis auseinandersetzen muss, deren Beitrag er aber um der architektonischen Orthodoxie willen nicht voll anerkennen kann. Für diese Gruppe bildet Entwurfswissen das eigentliche architektonische Wissen, Instrumentenwissen hingegen ist nur ein Mittel zum Zweck.

Für die zweite Gruppe sind Entwurfswissen und Instrumentenwissen zwei sich gegenseitig beeinflussende Dimensionen des architektonischen Wissens. In diesem Lager herrscht die Auffassung, dass die den Entwurf prägenden Herausforderungen und Chancen über die Bauformgestaltung hinaus in die fachlichen und praktischen Aufgaben der Leitung und Überwachung der Entwurfsausführung reichen. Die Angehörigen dieses Lagers vertreten zwar kein bestimmtes formales Projekt, verstehen aber die kritisch-theoretische und technisch-praktische

11 Lynn 2000: 11.

12 Iwamoto 2009: 5.

13 Colletti 2010.

14 Colletti 2010: 18 [Dt. Übers.: Annette Wiethüchter].

theoretical and practical advances from projective geometry. Remarkably, this ascendance and diffusion of mechanical drawing was reversed in the early twentieth century, or was at least restricted to disciplines more numerical and analytic than architecture. I argue that the virtual disappearance of these machines in the early modern period led to a regression in the architectural knowledge of geometry that is only now being recovered through the means of digital computation machines. The question of what kind of knowledge superseded this virtuosic machine and geometric knowledge may well reframe how we understand the epistemic consequences of the rise of modernity and the composition of architectural knowledge itself.

Machines and the Mechanical Construction of Curvature

The specific role of geometric drawing devices in the nineteenth century follows from a long tradition of architecture's engagement with the machine, dating at least to the time of Filippo Brunelleschi and Leon Battista Alberti. The work of these men attests to the fundamental role of the machine in the genesis of architecture as discipline.

Brunelleschi's architectural work was remarkable in that he designed not only buildings but also the instruments to construct these buildings: specialized hoists, jigs, and lifts. The dome of Florence Cathedral (completed 1436) is the most spectacular manifestation of this integrated approach, and his burial inscription witnesses this synthetic role: "How Filippo the architect excelled in invention is shown not only by the beautiful shell of his famous temple but also by the various machines that he invented with divine genius."¹⁸ This holistic approach provided an example for architects interested in extending the limits of design through technical invention. For Brunelleschi, architecture encompassed the instrumental knowledge of devices and machines needed to achieve the conceptual aims of design.

Brunelleschi's close contemporary in the latter part of his life, Leon Battista Alberti, provided a description of the architect's role

18 Cited in Prager/Scaglia: 135.

19 Alberti 1988 [1452]: 3.

20 Alberti 1988 [1452]: 3.

21 Carpo 2008: 50.

22 Prager/Scaglia 1970: 97, 105.

that was quite different. Alberti's description of the architect in his influential treatise *De re aedificatoria* (1452) is well known: "Him I consider an architect who, by sure and wonderful reason and method, knows both how to devise through his own mind and energy, and to realize by construction, whatever can be most beautifully fitted out for the noble needs of man, by the movement of weights and the joining and massing of bodies. To do this he must have a knowledge of all the highest and noblest disciplines."¹⁹

This definition has become foundational to architecture's self-understanding, and definitively acknowledges the role of knowledge in design. Yet Alberti's qualification of this definition has become equally decisive, and fundamental to the current debate over the role of instrumental knowledge by assigning that to a different profession: "I should explain exactly whom I mean by an architect: for it is no carpenter that I would have you compare to the greatest exponents of other disciplines: the carpenter is but an instrument in the hands of the architect."²⁰ Here we find what is essentially today's distinction between design knowledge and instrumental knowledge. In this simple separation of the architect from the carpenter, intended to elevate the discipline, Alberti calls into question how extensively the architect can or should know the technology of design or of construction.

Of course, Alberti shows a deep respect for those achievements of architecture that today would be considered mechanical engineering. As Mario Carpo has shown, Alberti was profoundly interested in mechanics, particularly for the control and replication of representation.²¹ Yet his machines lacked certain key innovations that Brunelleschi had already introduced, leading some critics to assert his incomplete understanding of contemporary mechanics.²² For Alberti, it seems, design knowledge was distinct from the instrumental knowledge of operative

Auseinandersetzung mit der Form als Quelle jedes Entwurfs- und Instrumentenwissens. Diese Architekten haben kein Problem damit, Fragen der Werkzeuge in den Mittelpunkt ihrer Studien zu stellen. Derartige Fragen sind für sie sogar wesentliche Faktoren für die sich wieder neu abzeichnende Rolle des Architekten als Baumeister.¹⁵ Der Computer bietet ihnen die Chance, diverse Wissensgebiete zu erschließen sowie praktisch zu nutzen und die Arbeitsleistung des Architekten zu steigern und zu organisieren.¹⁶ So wird der Computer de facto eine Ressource fachlich-beruflicher Organisation. Das zeigt sich etwa am wachsenden Interesse an Baustatikprogrammen oder Simulationssoftware, mit der sich ökologische Zusammenhänge darstellen lassen, die unter Umständen einen externen Fachberater überflüssig machen. Darüber hinaus können Entwerfer heutzutage ihre verfahrenstechnischen Kenntnisse durch Programmieren, Skripten und regelbasierte Entwürfe in Softwareprogramme einfügen, wodurch sie Entwurfswissen in Instrumentenwissen umwandeln. Hier besteht ein starkes Interesse am digitalen Werkzeugbau, an Basteleien und Hacking – und am offenen Eingeständnis, dass Erfindungen nicht dem Ingenieurwesen vorbehalten sein sollten.¹⁷ Für diese Gruppe wird Instrumentenwissen zu einem leistungsstarken Mittel Entwurfswissen zu erweitern; Architekturwissen umfasst notwendigerweise beide Formen.

Auch wenn es in dieser Auseinandersetzung um mehr als nur formale Fragen geht, wird sie verschärft durch Fragen zur Formgebung und insbesondere durch die Frage nach der Rolle des geometrischen Fachwissens bei der Gestaltung komplexer Formen. Wo sitzt das zur Erzeugung derartiger Formen erforderliche Wissen? Handelt es sich dabei um Architekturwissen? Welche erkenntnistheoretische Rolle spielt die Maschine bei der Entwicklung und Herstellung der Form?

Diese epistemologische Debatte hat Auswirkungen auf die zeitgenössische Architekturpraxis. Es könnte aber lehrreich sein, sich nicht länger darüber zu streiten, sondern das Augenmerk auf einen bestimmten

historischen Kontext zu richten, der dem gegenwärtigen insofern ähnlich ist, als er von der Maschine als Hilfsmittel der Formgebung fasziniert war. Die Vorstellung von dem in einer Maschine gespeicherten, verkapselten Wissen war im 19. Jahrhundert in Großbritannien und Frankreich von großer Bedeutung und führte zur Entwicklung mechanischer Zeichengeräte für komplexe Kurven und projektive Konstruktionen, die das Formenvokabular der Architektur vergrößerten, indem sie bestimmte theoretische und praktische Weiterentwicklungen der projektiven Geometrie in die mechanischen Bewegungen und Prozesse von Maschinen umsetzten. Erstaunlicherweise kam es Anfang des 20. Jahrhunderts zu einer Rückentwicklung in der Verbreitung des mechanischen Zeichnens oder zumindest zu deren Beschränkung auf analytischere Fachgebiete außerhalb der Architektur. Meiner Meinung nach führte das nahezu vollständige Verschwinden dieser mechanischen Zeichengeräte zu Beginn der klassischen Moderne dazu, dass das geometrische Wissen der Architektur weitgehend verloren ging und erst jetzt über die digitalen Rechner zurückgewonnen wird. Die Frage, welche Art von Wissen dieses virtuose Maschinen- und Geometriewissen ersetzte, könnte sehr wohl unser heutiges Verständnis der erkenntnistheoretischen Konsequenzen der Moderne und auch unser Verständnis des Architekturwissens selbst neu definieren.

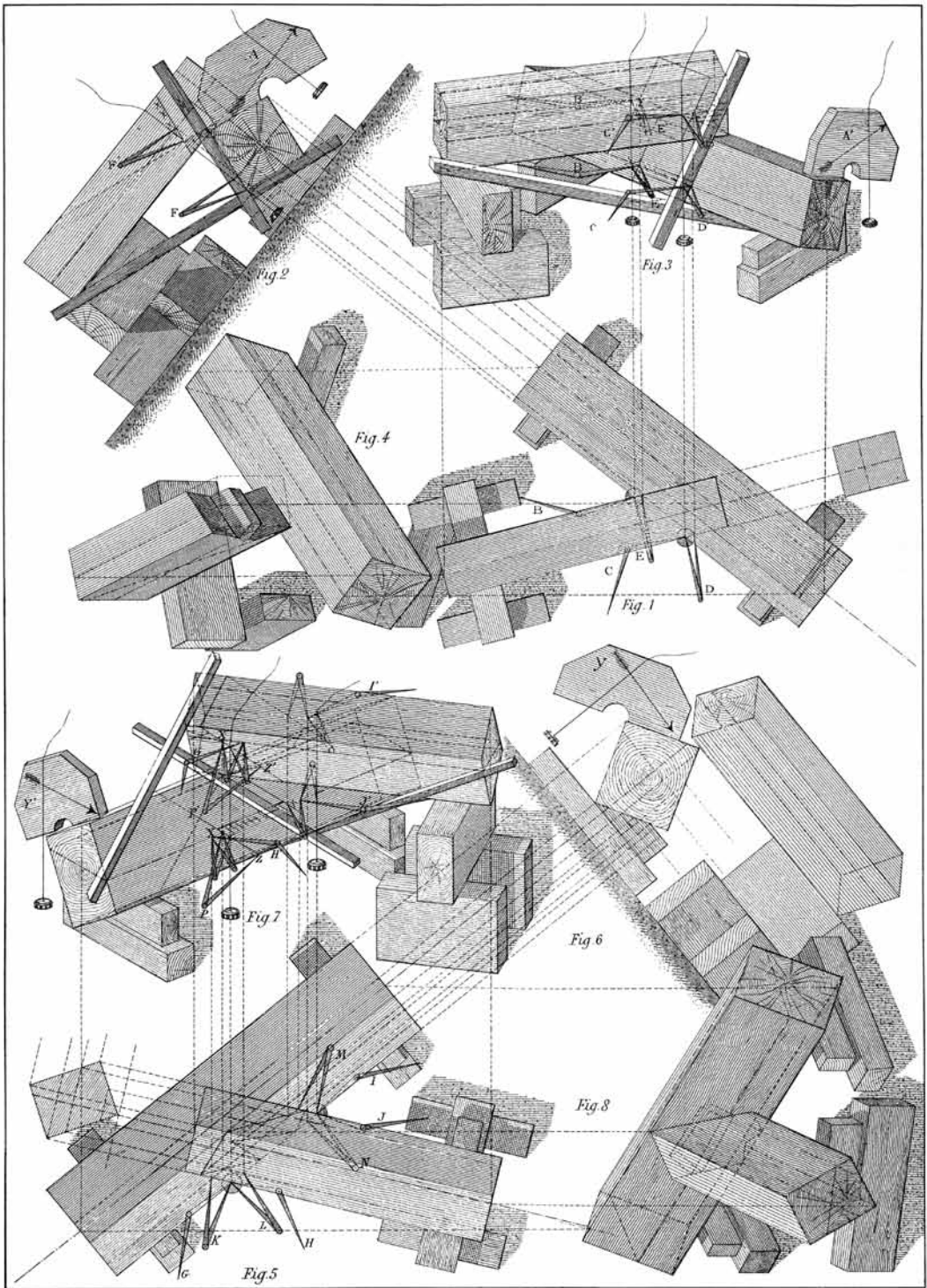
Maschinen und die mechanische Konstruktion der Kurvatur

Die besondere Rolle der geometrischen Zeichengeräte im 19. Jahrhunderts kam nicht von ungefähr: Maschinen im Sinne von Arbeitsgeräten des Architekten blickten auf eine lange Tradition zurück, die mindestens bis in die Zeit von Filippo Brunelleschi und Leon Battista Alberti zurückreichte. Das Schaffen dieser beiden Männer belegt die zentrale Rolle der Maschine in der Genese der Architektur als Fachdisziplin.

¹⁵ Kieren/Timberlake 2004: xi.

¹⁶ Kolarevic 2003: 59.

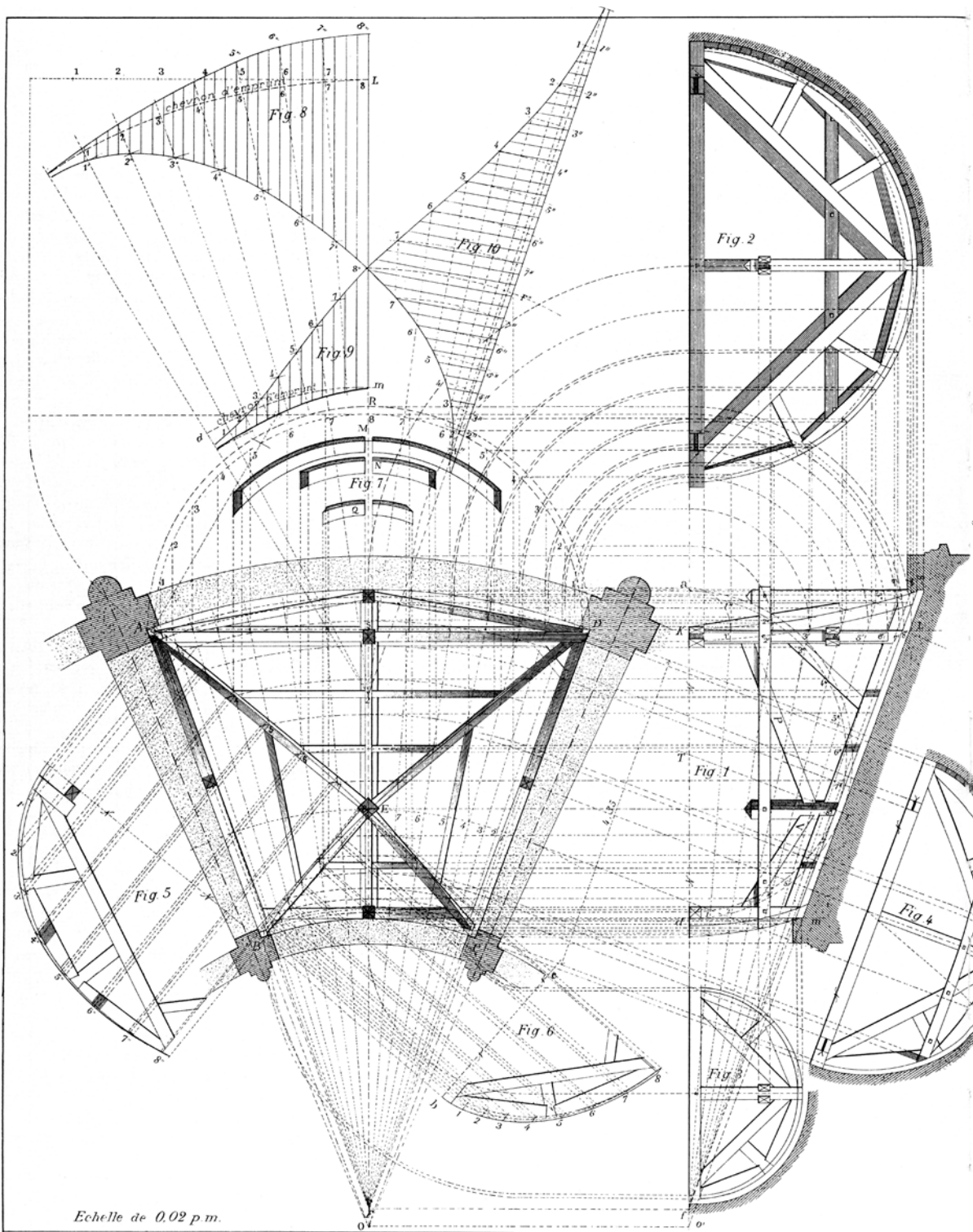
¹⁷ Aranda/Lasch 2006.



PIQUÉ DES BOIS À DEVERS ET À TOUT DEVERS.

Mit seinem Werk *Traité théorique et pratique de charpente* (1895) fasste Louis Mazerolle die Anwendung projektiver Geometrie auf den Holzbau zusammen. Die Herstellung komplexer Holzformen erforderte präzise mechanische Messungen. In dieser Zeichnung werden neben den Holzformen die dafür benötigten Messinstrumente mit abgebildet.

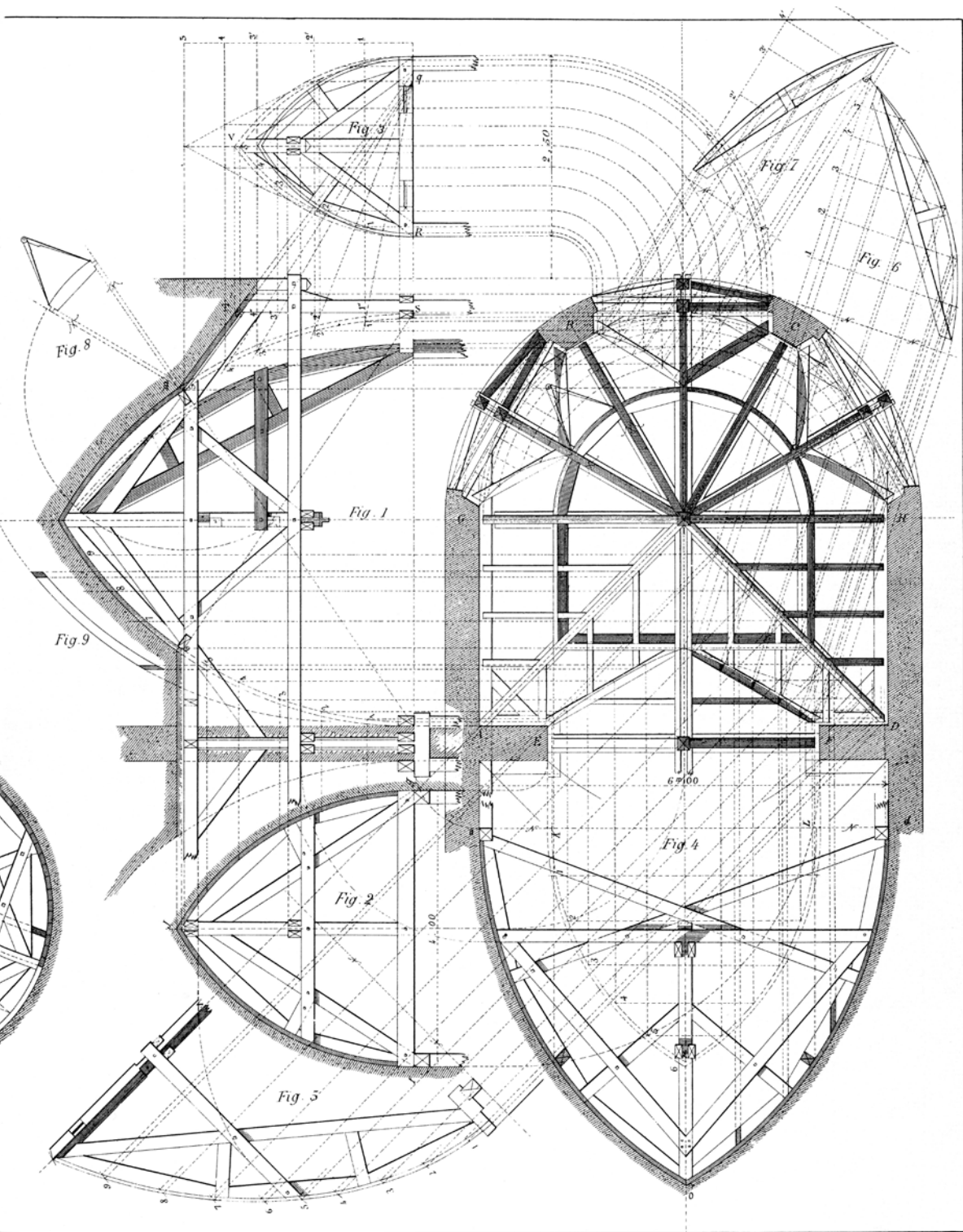
With his *Traité théorique et pratique de charpente* (1895), Louis Mazerolle synthesized the application of projective geometry to carpentry. The fabrication of complex wood pieces required precise mechanical measurement. Here the mechanical tools necessary for the measurement of these members are indicated in the drawing itself.



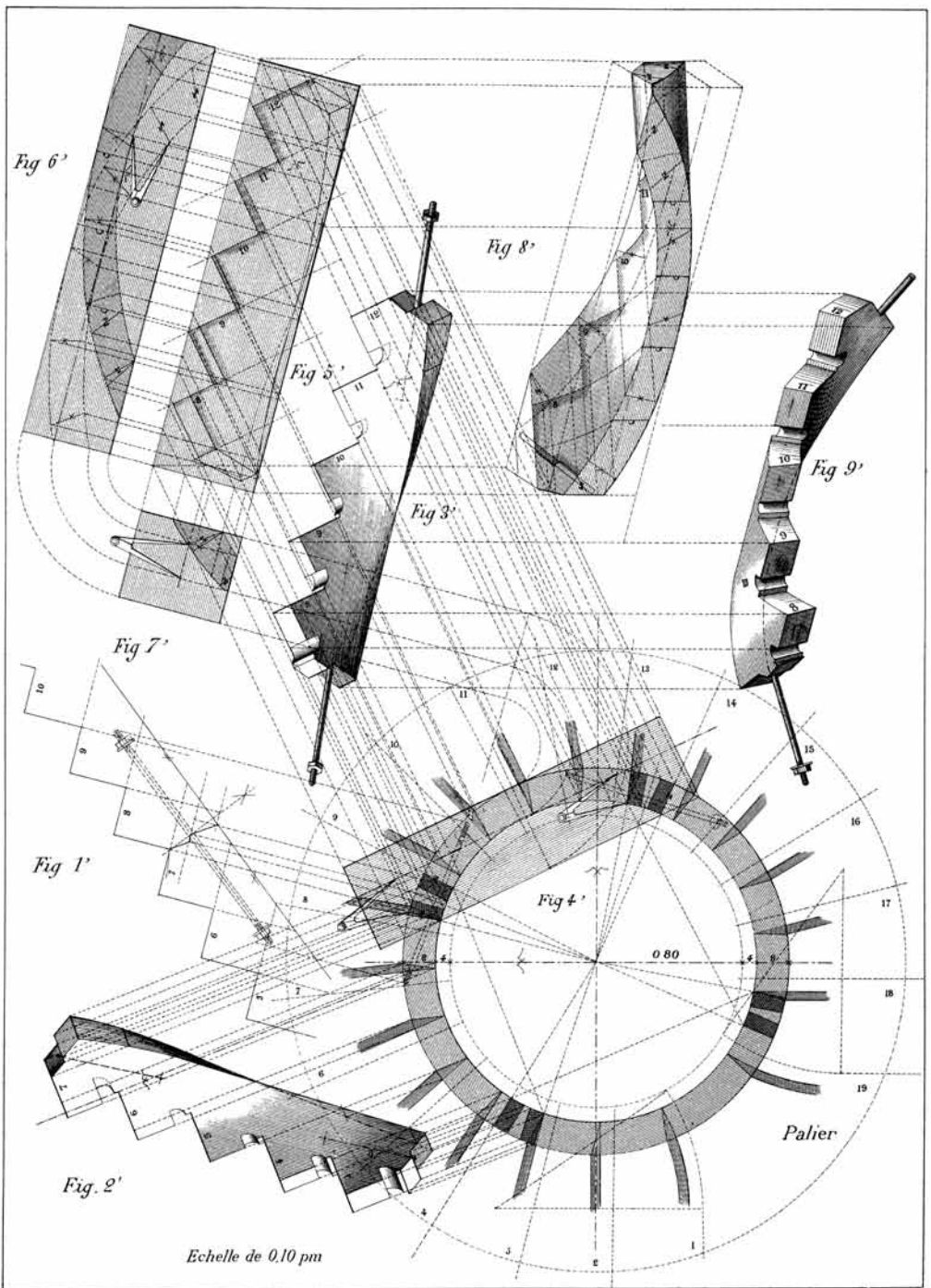
CINTRES POUR VOÛTE D'ARÊTES CIRCULAIRE ET CONIQUE.

Die Konstruktion komplexer Holzgewölbe erforderte die räumliche Entwicklung und Bemessung von Korbbögen, einschließlich der Berechnung komplexer abgewickelter Formen.

The framing of complex wooden vaults required the spatial development and measurement of compound curvature, including the calculation of complex unrolled shapes.



CINTRES POUR VOUSSURE EN ARC DE CLOÎTRE PÉNÉTRÉE.



DÉTAILS DE L'ESCALIER À JOUR ROND.

Die Virtuosität der Architekten und Handwerker des 19. Jahrhunderts mit komplexer, zweifach gekrümmter Geometrie umzugehen, wird in dieser Zeichnung deutlich, in der die minimal umgebenden Rechtecke von gedrehten, gekrümmten Bauteilen dargestellt werden. Diese Rahmen waren notwendig, um das Volumen der Holzleeren für das Geländer einer gedrehten Treppe zu berechnen. In manchen Fällen konnten Zeichenmaschinen, die zu dieser Zeit entstanden, bei der Berechnung helfen.

The virtuosity of nineteenth-century designers and craftsmen with even complex double-curved geometry is apparent from this drawing, in which the minimum bounding boxes of twisted curved members are represented. These bounding boxes were necessary to calculate the volume of wood blanks for the railing of a twisted staircase. In some cases these calculations could be aided by drawing machines that emerged during this period.

machines. The difference in the way Brunelleschi and Alberti approached the machine demonstrates that the role of instrumentality in design knowledge has been a subtext in architecture at least since the Renaissance.

Theoretical distinctions are often overtaken by practical concerns, however, and in the following centuries practical concerns very often involved resolving how to design and build complex geometric forms such as doubly-curved vaults, complex squinches, and intersecting arches. The need to supplement the architect's design knowledge with precise geometrical and mathematical procedures became especially pressing with the curved distortions, deformations, and projections of the Baroque. Initially this additional design knowledge was generated by architects themselves. Robin Evans has written extensively of the developments in architecture that enabled perspective and projection to be employed to design apparent and actual spatial distortions.²³ In the mid-sixteenth century, the work of the French architect Philibert de l'Orme, who applied such techniques of distortion to design and stonemasonry, was particularly influential.²⁴ One focus of interest was the ellipse, a conic section that results when a circle is projected onto a ramp or an oblique plane. During the Baroque period, the ellipse took on its most recognizable role as a frequent trope of ornament. Gradually, however, architects realized that the construction of an ellipse could be one in a longer procedural sequence of formal moves that ultimately went beyond motif to define a space itself. For example, the ellipse appears as the intersection of two cylinders of equal radii, and thus as the rib of a vault; or as the intersection of a single cylinder with an oblique wall or ceiling, and thus as an embrasure. This understanding of the conic sections as being spatial constructs changed the status of curved geometry from something essentially flat and merely decorative to something inherently spatial.

The drawing procedures required by de l'Orme and others to represent curved forms were sophisticated and time consuming, and resembled cartographic operations in their intricacy. The complexity of these design

23 Evans 2000 [1995]: 187.

24 Potie 1996: 9.

25 Horsburgh 1996: 256.

26 George Adams's *Geometrical and Graphical Essays* (1791) first introduced Suardi's work to an English-speaking audience. Adams's work was first published in German in 1795.

27 Adams 1797 [1791]: 152.

operations required knowledgeable and skilled practitioners. Some of these architects, engineers, and cartographers turned to toolmakers to encapsulate the knowledge of these geometric operations into specific drawing machines, thereby instrumentalizing this aspect of design knowledge. In this instrumentalization, the toolmakers deployed various methods of mechanical construction of conics developed by mathematicians such as René Descartes, Isaac Newton, and Colin Maclaurin, including methods for the design of ellipses, parabolas, and hyperbolas.²⁵ By the eighteenth century advanced tool making to support the design of more complex curves had become a discipline in itself, with its own encyclopedic references and disciplinary projects. Nicolas Bion's *Traité de la construction et des principaux usages des instruments de mathématiques* (1709) provides a catalog of the state-of-the-art of tool making during this period. The work begins with the typical compasses and dividers but moves to more ambitious implements such as trisectors and elliptical trammels, which were applicable in architectural contexts.

Eighteenth-century toolmakers proposed a host of methods for the construction of complex curves that exploited a new mechanical understanding of motion. The Italian Giambattista Suardi's work in particular is remarkable for its range and advances in this domain. In his *Nuovi istromenti per la descrizione di diverse curve antiche e moderne e di molte altre* (1752),²⁶ Suardi proposed two instruments of particular note: the first was a conchoidograph for the drawing of conchoid curves, and the second was a sophisticated "geometrical pen."²⁷ This "pen" was actually a compound machine designed by Suardi to mechanically draw curves ranging from ellipses to complex epicycloids. The geometrical pen exploited the combinatorial variety of curves that could be generated by

Brunelleschis Bauten sind insofern bemerkenswert, als er nicht nur die Gebäude entwarf, sondern auch die technischen Geräte, mit deren Hilfe sie errichtet wurden: spezielle Flaschenzüge, Lehren und Hubwerke. Die Kuppel des Florentiner Doms (1436 vollendet) ist das spektakulärste Zeugnis dieses integrierten Ansatzes, und die Inschrift auf Brunelleschis Epitaph belegt seine Kunst der Synthese aller architektonischen Künste: „Wie viel der Architekt Filippo mit dädalischer Kunst vermochte, davon können sowohl das wundersame Gewölbe dieser so berühmten Kirche als auch die von ihm mit göttlichem Geist erfundenen Maschinen Zeugnis ablegen.“¹⁸ Dieser holistische Ansatz wurde zum Vorbild für diejenigen Architekten, welche die Grenzen des architektonischen Entwerfens durch technische Erfindungen überwinden wollten. Für Brunelleschi umfasste Architektur auch die genaue Kenntnis der Instrumente, Geräte und Maschinen, mit denen sich das architektonische Konzept ausführen lässt.

Leon Battista Alberti, Kollege Brunelleschis in dessen zweiter Lebenshälfte, dagegen lieferte in seiner Abhandlung *De re aedificatoria* (Zehn Bücher über die Baukunst, 1452) eine ganz andere bekannte Definition der Aufgabe des Baumeisters: „Ein Architekt wird der sein, behaupte ich, der gelernt hat, mittels eines bestimmten und bewundernswerten Planes und Weges sowohl in Gedanken und Gefühl zu bestimmen, als auch in der Tat auszuführen, was unter der Bewegung von Lasten und der Vereinigung und Zusammenfügung von Körpern den hervorragendsten menschlichen Bedürfnissen am ehesten entspricht und dessen (möglichste) Erwerbung und Kenntnis unter allen wertvollen und besten Sachen nötig ist, derart wird also ein Architekt sein.“¹⁹

Albertis berühmte Definition würdigt die Rolle des Wissens bei der architektonischen Entwurfsarbeit und ist zur Grundlage des baumeisterlichen Selbstverständnisses geworden. Sie beginnt allerdings mit einer Einschränkung, die für die heutige Debatte zur Rolle des Instrumentenwissens in der Architektur von zentraler Bedeutung

ist, weil sie die Kenntnis der Werkzeuge einem anderen Beruf zuweist: „Doch glaube ich auseinandersetzen zu müssen, wen ich für einen Architekten gehalten wissen will. Denn ich werde Dir keinen Zimmermann bringen, den Du mit den hervorragendsten Männern anderer Fächer vergleichen sollst. Die Hand des Arbeiters dient ja dem Architekten nur als Werkzeug.“²⁰ Hier steht also, was den eigentlichen Unterschied zwischen Entwurfswissen und Instrumentenwissen bis heute ausmacht. Mit der simplen Unterscheidung zwischen Architekt und Zimmerer wollte Alberti den Architektenberuf adeln; gleichzeitig warf er damit aber auch die Frage auf, inwieweit der Architekt die für Entwurf und Bauausführung nötige Technik kennen und beherrschen sollte.

Natürlich zollte Alberti denjenigen Leistungen der Architektur, die wir heute dem Maschinenbau zuordnen würden, höchste Anerkennung. Wie Mario Carpo nachgewiesen hat, interessierte sich Alberti sehr für Mechanik, speziell für die präzise Ausführung und Vervielfältigung von Darstellungen.²¹ Seinen Maschinen fehlten aber wichtige Innovationen, die Brunelleschi bereits eingeführt hatte, weshalb einige Kritiker behauptet haben, Albertis Wissen auf dem Gebiet der damaligen Mechanik sei lückenhaft gewesen.²² Alberti selbst unterschied offenbar zwischen Entwurfswissen und einem Instrumentenwissen, das den Betrieb von Geräten und Maschinen umfasste. Brunelleschis und Albertis unterschiedliche Auffassungen von Maschinen zeigen, dass die Frage nach der Rolle des Instrumentenwissens im Entwurfswissen spätestens seit der Renaissance ein unerschwelliges Thema der Architektur ist.

Theoretische Unterscheidungen werden allerdings häufig durch die Praxis überholt, und in den folgenden Jahrhunderten ging es bei der Lösung konkreter Bauaufgaben

18 Zitiert nach Prager/Scaglia 1970: 135 [Dt. Übers.: Annette Wiethüchter].

19 Alberti 1991 [1452]: 9.

20 Alberti 1991 [1452]: 9.

21 Carpo 2008: 50.

22 Prager/Scaglia 1970: 97, 105.

the compound motion of two or more circles rolling along each other's circumferences. The construction of the pen made it possible to vary the radii, tracing speed, and length of the drawing arm to produce hundreds of distinct curve types. By this method one could produce straight lines, circles, ellipses, and many other higher-order compound cycloids.²⁸ In many ways the geometrical pen became a standard by which later nineteenth-century machines would be judged. Indeed some of the notable ellipsograph designs employ only slightly altered methods.

These instruments could obviate the need for the user to possess the geometric design knowledge encapsulated in the instruments, for instance concerning the construction of complex figures, particularly conic sections such as the ellipse. As a consequence of this encapsulation, the stage was set for an even more profound mechanization of form to follow.

New Domains of Geometric Knowledge

The encapsulation of design knowledge, or, more specifically, geometric knowledge, into machines accelerated markedly in the nineteenth century, driven both by developments in the geometry of curves and curved surfaces and by the emergence of more exact and scalable machine reproduction technologies. In particular, projective geometry opened up new avenues of mechanical investigation: "It was natural that with the further development of projective geometry, which lends itself easily to geometrical constructions, other methods of generating conics should arise."²⁹ These developments had a reciprocal relationship with each other: the requirements of precise geometric drawings drove the development of particular instruments, while the availability of exact instruments facilitated new types of drawings and thus approaches to geometry.

In mathematics, some remarkable theoretical developments illuminated the possibilities and limitations of mechanical instrumentation for the representation of curves and surfaces. In the late 1820s, the French mathematician Évariste Galois

28 Adams 1797 [1791]: 151.

29 Horsburgh 1914: 256.

30 Monge 1989 [1799]: 4.

proposed a remarkable abstract algebraic approach to geometry that ultimately proved that some basic curves and figures could not be constructed by compass alone. This demonstrated that compound motion of more sophisticated machines would be necessary in order to design a broad lexicon of curved forms.

A second major theoretical development was the codification of descriptive geometry through the work of the French mathematician and physicist Gaspard Monge. Monge's *Géométrie descriptive* (1799) systematized the conceptual and pedagogical approach he had developed over the previous years for the mathematical description of spatial forms as complexes of projections. His new approach to representing curves and curved surfaces in space provided a much more general and flexible system than typical orthographic projection, and his pedagogical propagation of these practices (above all at the École Polytechnique in Paris) enabled more sophisticated spatial representations in design and engineering in the early nineteenth century. Particularly remarkable were Monge's solution of certain general conic intersections as they pertained to vaults. He demonstrated a method to derive, by drawing, the intersections of general extrusion surfaces, and pointed the way to a more ambitious and thoroughly spatial understanding of curved geometries. He also explicitly affirmed the problems of machine operation as central to the subject matter of geometry, and a belief that mastery of spatial geometry was a key element of the national evolution of French machine industry.³⁰

These developments had immediate impacts on the practical craft of stereotomy (the stone cutting of complex three-dimensional shapes) as well as on the more theoretical discourse of projective geometry (the description of spatial form through linear or planar projection). Monge's methods encouraged his contemporaries and successors to explore the relationship of geometric design knowledge to all parts of the technical

vielfach um die Frage, wie man komplexe geometrische Gebilde – zum Beispiel Doppelgewölbe, Eckkragbögen oder einander durchdringende Bögen – zu konstruieren hatte. Der Architekt musste sein gestalterisches Wissen also um gründliche Kenntnisse auf den Gebieten der Geometrie und Mathematik erweitern, wenn er die verzerrten Schwünge, Verformungen sowie Projektionen des Barockstils erzeugen wollte. Ursprünglich eigneten sich Architekten dieses Entwurfswissen autodidaktisch an. Robin Evans hat die architektonischen Neuentwicklungen in perspektivischer Darstellung und Projektion, mit denen es gelang, scheinbare und tatsächliche räumliche Verzerrungen zu entwerfen, ausführlich beschrieben.²³ Mitte des 16. Jahrhunderts wandte der französische Baumeister Philibert de l'Orme diese Verzerrungstechniken auf Entwurf und Steinschnitt an und übte damit großen Einfluss auf andere Architekten aus.²⁴ Besonderes Interesse galt der Ellipse, einem Kegelschnitt, der entsteht, wenn ein Kreis auf eine Rampe oder eine andere geneigte Fläche projiziert wird. Im Barock spielte die Ellipse die größte, offensichtlichste Rolle als Ornament. Allmählich erkannten Architekten jedoch, dass die Konstruktion einer Ellipse Teil einer längeren Reihung formaler Elemente sein könnte, mit der man schließlich nicht nur dekorative Muster schaffen, sondern ganze Räume umreißen würde. Zum Beispiel trat die Ellipse als Überschneidung zweier Zylinder mit gleichem Radius und somit als Gewölberippe, oder als Schnittfläche zwischen einem einzigen Zylinder und einer schrägen Wand oder Decke, und somit als nach innen abgeschrägte Fenster- oder Obergadenlaibung in Erscheinung. Diese Interpretation von Kegelschnitten als Raumkonstrukte erhob die Kurvengeometrie aus dem Bereich eher flacher Dekoration zur dreidimensionalen architektonischen Form.

Die von de l'Orme und anderen angewandten Zeichentechniken der Darstellung gekrümmter Formen waren anspruchsvoll und erforderten großen Zeitaufwand. In ihrer ausgefeilten Präzision ähnelten sie kartografischen Arbeiten und konnten nur von geschickten, kenntnisreichen Zeichnern

ausgeführt werden. Einige Architekten, Ingenieure und Kartografen ließen sich von Werkzeugmachern spezielle Zeichengeräte anfertigen, in die ihre geometrischen Kenntnisse sozusagen eingebaut wurden. Auf diese Weise instrumentalisieren sie diese Aspekte des Entwurfswissens. Im Zuge dieser Instrumentalisierung setzten die Werkzeugmacher verschiedene Methoden der mechanischen Konstruktion von Kegeln ein, die von Mathematikern wie René Descartes, Isaac Newton und Colin Maclaurin entwickelt worden waren, darunter Methoden zum Entwurf von Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln.²⁵ Ende des 18. Jahrhunderts hatte sich dann die Herstellung von Zeichengeräten für die Darstellung komplexer Kurven bereits zu einem eigenen Zweig der Werkzeugmacherei mit eigenen technischen Lehrbüchern und Erfindungen entwickelt. Der Franzose Nicolas Bion zum Beispiel veröffentlichte 1709 die Abhandlung *Traité de la construction et des principaux usages des instruments de mathématiques*, das einen Katalog zum Stand der Technik in der Kunst des Instrumentenbaus zu Beginn des 18. Jahrhunderts umfasst. Es beginnt mit den herkömmlichen Kompassen und Zirkeln, um sich dann komplizierteren Geräten wie Dreiteilern und Ellipsenzirkeln zu widmen, die alle auch in der Architektur Verwendung fanden.

Die Werkzeugmacher des 18. Jahrhunderts entwickelten eine ganze Reihe an Methoden zur Konstruktion komplexer Kurven auf der Basis eines neuen mechanischen Verständnisses von Bewegung. Insbesondere die Arbeiten des Italieners Giambattista Suardi stechen durch ihre Vielfalt und Fortschritte in diesem Bereich hervor. In seinem Werk *Nuovi istromenti per la descrizione di diverse curve antiche e moderne e di molte altre* (1752),²⁶ schlägt Suardi zwei

23 Evans 2000 [1995]: 187.

24 Potie 1996: 9.

25 Horsburgh 1996: 256.

26 George Adams' *Geometrical and Graphical Essays containing a General Description of the Mathematical Instruments used in Geometry, Civil and Military Surveying, Levelling, and Perspective* (1791) führte als erstes Suardis Arbeiten einer englischsprachigen Leserschaft vor. Auf Deutsch wurde Adams' Werk 1795 erstmals veröffentlicht.

process of architecture and fabrication, particularly carpentry and stonecutting. During the nineteenth century several technical professors who were also master craftsmen, such as Jean Paul Douliot, Charles-François-Antoine Leroy, Louis Monduit, and Louis Mazerolle, published practical works on both stereotomy and projective geometry. Architects took particular interest in the new formal possibilities offered by these projective classes of surfaces, and made these developments of surface geometry an object of design knowledge.

Douliot's *Traité speciale de coupe des pierres* (1825) takes a specifically taxonomic approach: he classifies the types of surfaces he judges most appropriate to construction, including particularly the ruled surfaces, that is, the surfaces generated by the movement of a generatrix line through space. He goes on to classify single and double curvature surfaces, and cylindrical, conic, ellipsoidal, and other types of more complex surfaces. But since this is all a treatise on construction, he proceeds immediately to the types of new surfaces most appropriate for a wall, whether right, cylindrically oblique, or conic, and its decomposition into stones of the appropriate geometric typology.³¹ Again, considerable time is devoted to the resolution of conic vaults.³² It provides a remarkable synthesis of design, geometric, and architectural knowledge in one work.

As the century progressed a continuous and reciprocal evolution of conceptual techniques of geometry and material techniques of irregular stone and wood cutting enriched the formal range of architecture. Manuals particularly for architects abound, such as C. Protot's *Cours spécial d'architecture, ou Leçons particulières de géométrie descriptive* (1838). In some cases encyclopedic compendiums such as *La Science des artistes* (1844) compiled contributions by many geometers and architects, summarizing the theoretical state of the art of descriptive geometry. Other works were intended more for craftsmen. For example, Charles-François-Antoine Leroy's *Traité de stéréotomie, comprenant les applications de la géométrie descriptive* (1844) presents all the key

31 Douliot 1825: 59.
32 Douliot 1825: 149.
33 Leroy 1844: 64.

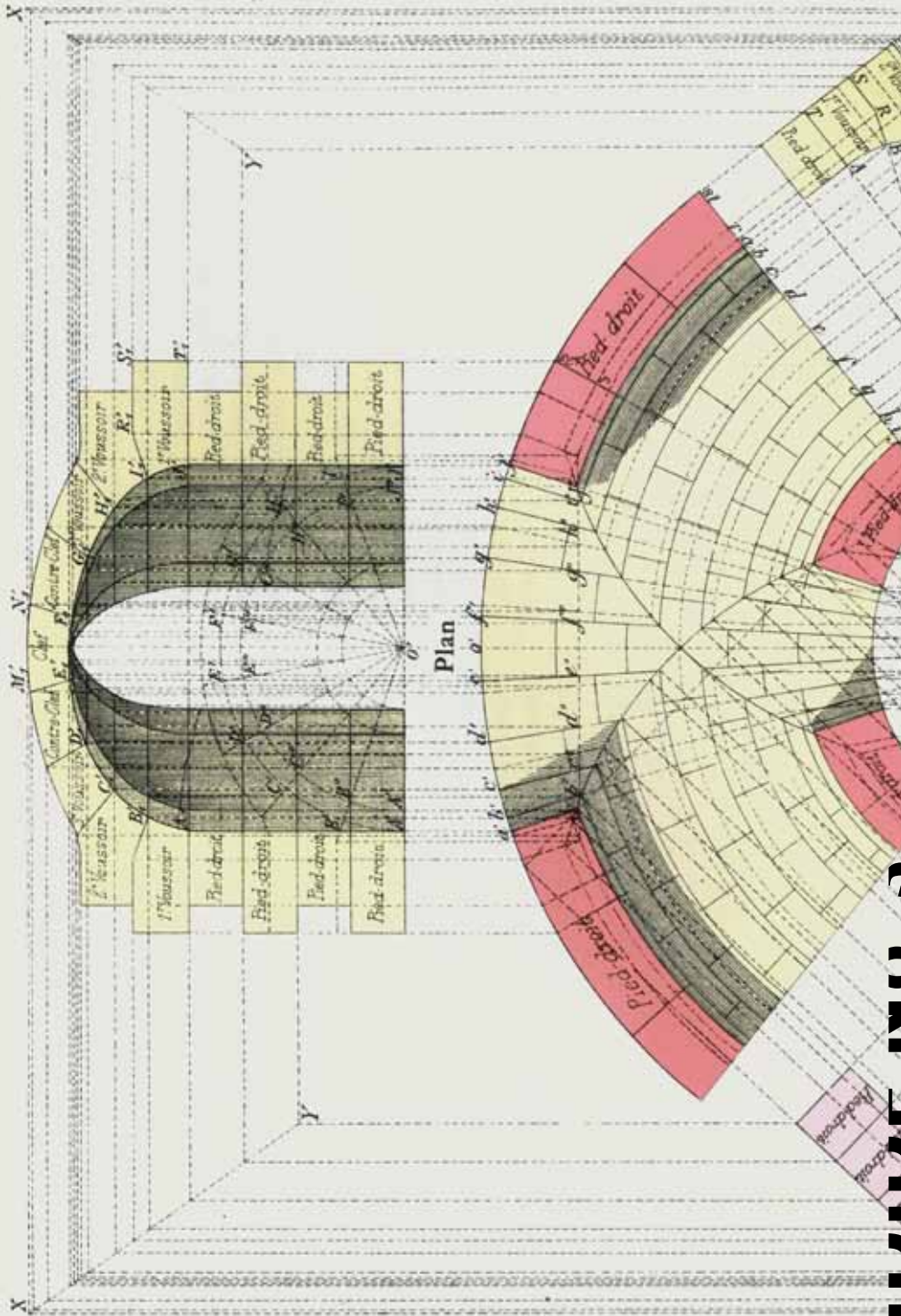
stonecutting and carpentry techniques to construct complex geometries of the period, including complex doubly-curved spiral vaults.³³

By the latter quarter of the nineteenth century, these techniques had been completely assimilated at the technical level of architectural construction, and with the techniques fully settled the publications of this period became graphic showpieces. Monduit's *Traité théorique et pratique de stéréotomie* (1889) presents the canonical constructive and discretized solutions to many fundamental geometric problems, including the intersections of generalized cylinders and cones. Perhaps this treatise is the most compelling example of the extent of geometric sophistication required to execute certain nineteenth-century designs, particularly vaults. Mazerolle's *Traité théorique et pratique de charpente* (1895) complemented in many ways Monduit's work. In it Mazerolle records the standard yet intricate projective and stereotomic methods to manipulate wood planks, using methods of volumetric intersection to derive planking diagrams for complex roof structures. He also provided rigorous methods for the description of curved wood beams, which were often the necessary results of volumetric intersections. In some ways these constructions were even more technically sophisticated than the stereotomic ones; considered together, these works on carpentry and stonecutting represent the pinnacle of geometric understanding in nineteenth-century craft.

This expanded geometric knowledge had a direct and profound impact on architecture in the nineteenth century. Perhaps no architect used the projective and surface methods to greater effect than Antoni Gaudí on his Sagrada Família cathedral in Barcelona (1882–present). Gaudí's instructor in projective geometry had been a student and disciple of the mathematical approach of Monge, and he in turn introduced his

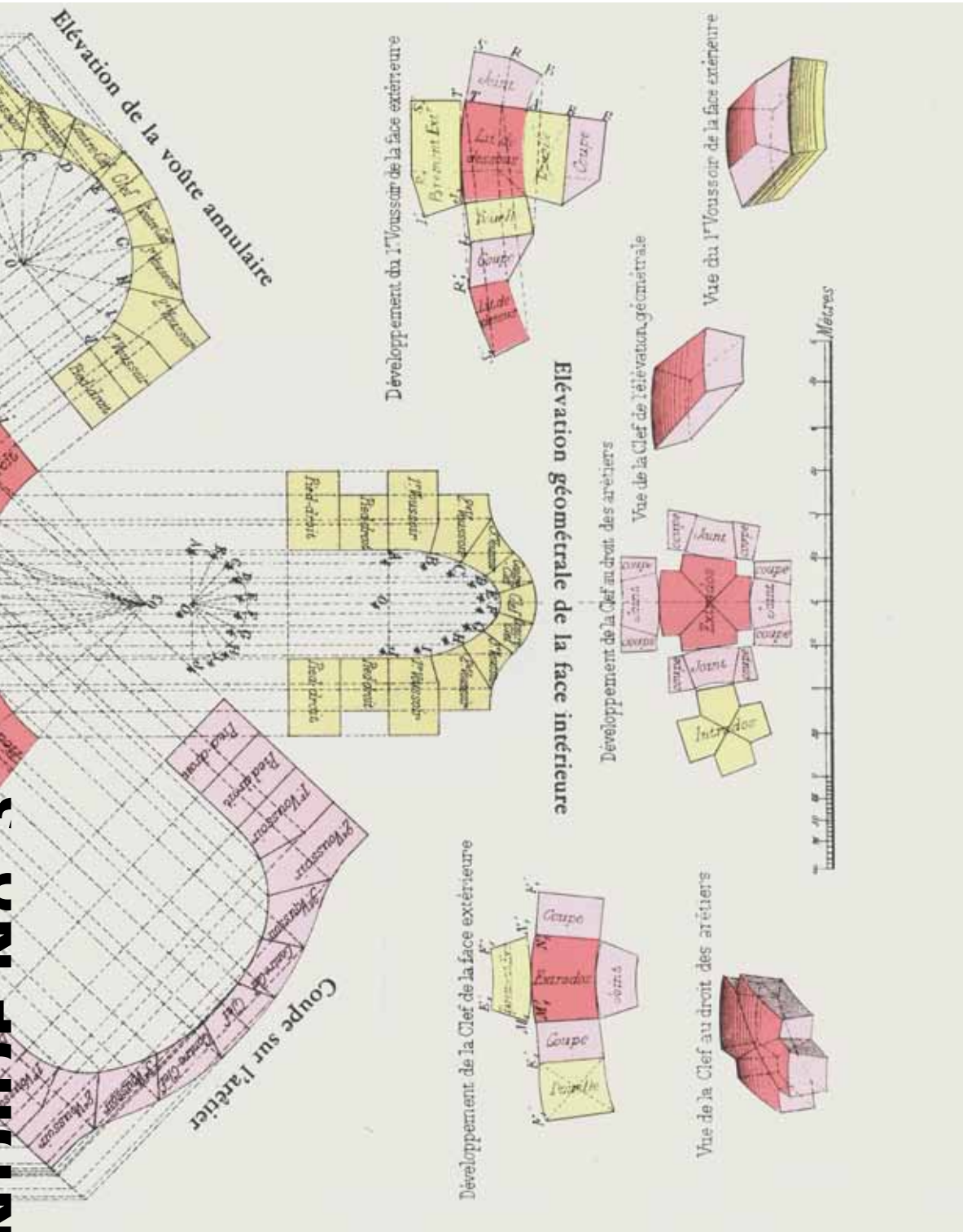
VOÛTE D'ARÊTE DANS UNE VOÛTE ANNULAIRE

Elévation géométrale



Louis Monduits *Traité théorique et pratique de stéréotomie* (1889) präsentierte Lösungen zahlreicher grundlegender geometrischer Aufgabenstellungen. Dieses verzerrte Gewölbe – eine Verschneidung von einem Zylinder und einem Torus – zeigt, welche komplizierten geometrischen Operationen Architekten und Bauhandwerker im 19. Jahrhundert ausführten. Dies

beinhaltete auch die Entwicklung abwickelbarer Formen für die Diskretisierung nicht genormter, gekrümmter Verschneidungen. Bei den Bogenüberschneidungen handelte es sich oft um Kegelschnitte oder deren Ableitungen, von denen viele mechanisch konstruierbar sind.



Louis Monduit's *Traité théorique et pratique de stéréotomie* (1889) presented solutions to many fundamental geometric problems. This distorted vault, an intersection between a cylinder and a torus, illustrates the more sophisticated types of geometric operations architects and craftsmen undertook during the nineteenth century, including the development of unfolded

shapes in the discretization of nonstandard curved intersections. These intersections were often conic sections or their derivatives, many of which are mechanically constructible.

besonders erwähnenswerte Instrumente vor. Das erste war ein Konchoidograf für das Zeichnen von konchoiden Kurven, das zweite war ein fortgeschrittener „geometrischer Schreiber“.²⁷ Dieser „Schreiber“ war eine von Suardi konstruierte Maschine mit mehrfachen Operationen, die Kurven – von Ellipsen bis hin zu komplexen Epizykloiden – zeichnen konnte. Das Gerät nutzte die kombinatorische Vielfalt von Kurven, die durch Teilbewegungen von zwei oder mehr Kreisen gebildet werden, die sich entlang ihrer Kreislinien abrollen. Der geometrische Schreiber ist so konstruiert, dass sich die Radien, Rollgeschwindigkeiten und Längen der Fahrstifthalter verschieden einstellen lassen, so dass mit dem Gerät Hunderte von geraden Linien und Kurvenformen wie Kreise, Ellipsen sowie gewöhnliche, verkürzte oder verlängerte Zykloide erzeugt werden können.²⁸ In vielerlei Hinsicht wurde Suardis geometrischer Schreiber zum Standard, an dem später entwickelte technische Zeichengeräte des 19. Jahrhunderts gemessen wurden. Tatsächlich weisen etliche der besten Ellipsografen nur leicht veränderte Methoden auf.

Das in diese Instrumente gewissermaßen eingebaute Wissen machte unter Umständen den Erwerb des geometrischen Entwurfswissens durch den Zeichner überflüssig, so zum Beispiel wenn es um die Konstruktion komplexer Figuren ging, insbesondere von Kegelschnitten wie etwa Ellipsen. Infolge dieser Verkapselung war der Weg frei für die spätere noch weiter gehende Mechanisierung der Form.

Neue Bereiche des Geometrie-wissens

Die Speicherung von Entwurfswissen, speziell des Geometrie-wissens, in mechanischen Zeichengeräten nahm im Laufe des 19. Jahrhunderts rasch zu. Dies wurde sowohl durch neue Erkenntnisse zur Geometrie von Kurven und gekrümmten Flächen und durch die Entwicklung präziserer, skalierbarer Techniken im Maschinenbau vorangetrieben. Insbesondere eröffnete die projektive Geometrie neue Wege für mechanische Entwicklungen: „Es war natürlich, dass mit

der Weiterentwicklung der projektiven Geometrie, die sich der geometrischen Konstruktion geradezu anbietet, andere Methoden zur Konstruktion von Kegelschnitten entstehen sollten.“²⁹ Diese Entwicklung verlief wechselseitig: Der Bedarf an präzisen Bauzeichnungen förderte die Entwicklung von Präzisionsinstrumenten, während die Verfügbarkeit dieser Instrumente neue Arten von Zeichnungen – und damit neue geometrische Ansätze – ermöglichte.

In der Mathematik erklärten einige erstaunliche neue Theorien die Möglichkeiten und Grenzen mechanischer Instrumente bei der Darstellung von Kurven und gekrümmten Flächen. Ende der 1820er Jahre schlug der französische Mathematiker Évariste Galois eine bemerkenswerte, abstrakte algebraische Herangehensweise zur geometrischen Kalkulation vor, die schließlich bewies, dass für die Konstruktion bestimmter Grundkurven und -figuren der Kompass allein nicht ausreicht. Damit zeigte sich, dass höher entwickelte Maschinen nötig sein würden, die in der Lage wären, gleichzeitig mehrere Teilbewegungen auszuführen, um ein breites Spektrum geschwungener Formen zu entwerfen.

Eine weitere wichtige Theorie entwickelte der französische Mathematiker und Physiker Gaspard Monge mit seinem Werk zur darstellenden Geometrie, *Géométrie descriptive* (1799). Darin systematisierte er die mathematische Darstellung dreidimensionaler Objekte auf einer zweidimensionalen Darstellungsebene, mit deren Prinzipien und Didaktik er sich in den Jahren zuvor beschäftigt hatte. Seine neue Methode, Kurven und gekrümmte Flächen im Raum darzustellen, lieferte ein wesentlich umfassenderes und flexibleres System als die typische orthografische Projektion, und da Monge sie (unter anderem an der Pariser École Polytechnique) lehrte, ermöglichte seine darstellende Geometrie bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts anspruchsvolle Darstellungen in Architektur und Ingenieurwissenschaften.

27 Adams 1795 [1791]: 152.

28 Adams 1795 [1791]: 151.

29 Horsburgh 1914: 256 [Dt. Übers.: Susanne Schindler].

students to the use of ruled surfaces and surface intersections in the design of spaces.³⁴ In the Sagrada Família the result is that the deployment of ruled surfaces for spatial design is pervasive. One particularly striking example is in the frames of certain windows, which are themselves hyperbolas of revolution, and whose intersections then may be constructed as projected ellipses.³⁵ Though exceptional, Gaudi's work is characteristic of the prevalent use of advanced geometric knowledge in the design of space toward the end of the nineteenth century.

The work of Monge and his successors greatly expanded design knowledge, but also created new technical requirements for architects hoping to deploy his methods. Monge's approach had a mathematical rigor, and without the aid of mechanical tools, production of the requisite drawings was intricate and time-consuming work. Projective methods required extensive use of auxiliary views at irregular or oblique angles, which in turn required mechanical compasses. The development of curved geometries was even more labor intensive: point-by-point projection and interpolation was often required for even the simplest of curves. In addition, many of the distorted shapes or intersections between shapes derived through projective constructions were ideally drawn by machine, which was quicker and more accurate than point-by-point projections. The complexity of design ambition in the nineteenth century thus contributed to the need for machines that could encapsulate these geometric operations in a simple and repeatable way. Ultimately, it led to the need to transform design knowledge into instrumental knowledge by way of the machine.

Nineteenth-Century Knowledge Machines

The new geometric methods created more urgent requirements for tools that could encapsulate complex geometric operations to rapidly—almost algorithmically—assist the designer in generating these projections or intersections. The construction of conic sections—ellipses, parabolas, hyperbolas—was particularly key, since these frequently occur-

34 Burry/Coll Grifoll/Gomez Serrano 2008: 18.

35 Burry/Coll Grifoll/Gomez Serrano 2008: 70.

36 Piedmont-Palladino 2007: 42.

37 Stanley 1878: 77; ICE 1851: 245.

38 Stanley 1878: 85.

39 Stanley 1878: 72.

40 Ein herausragendes Beispiel einer solchen Maschine befindet sich in der Harvard Collection of Historical Scientific Instruments, Inventory 5120.

ring sections are the surface intersections and projected images of more sophisticated figures. The English geologist and writer John Farey proposed one of the first influential mechanical tools for the construction of ellipses in 1813.³⁶ Known as ellipsographs, they provided more regularity and controlled variability than previous methods of ellipse construction. In particular, they allowed the construction of figures with a greater range of major and minor axes than the classical elliptical trammel. Soon tools began to emerge to represent other, more complex curves as well, often with specifically architectural applications. Various types of helicographs for the drawing of logarithmic spirals, the volutes of Ionic columns, and the traces of spiral staircases were introduced and patented by F. C. Penrose in 1850.³⁷ English machinist William Ford Stanley's conchoidograph for the representation of the profile of classical columns followed, although based on principles detailed by Suardi a century before.³⁸ Stanley was particularly prolific, designing ellipsographs, conchoidographs, and various spirographs for the production of complex curves, as well as pantographs for the interactive mechanical replication of drawings. Architects also designed their own instruments: In 1871, the Englishman Edward Burstow designed a complex ellipsograph that was considered by contemporaries among the best.³⁹ Stanley adapted Burstow's design for his own ellipsographs, produced later.⁴⁰

Perhaps the most sophisticated of such machines was the clampylograph, designed by the physicist and meteorologist Marc Dechevrens around 1900. This intricate device featured several compound motions but could replicate a vast range of curves, over 979 distinct types, including all of the conic sections and a range of cycloids and epicycloids.

Besonders bemerkenswert war Monges Lösung für bestimmte Kegelschnitte von Gewölbeverschnidungen. Er zeigte damit, wie man in Handzeichnungen die Überschnidungen allgemeiner Prismen- und Zylinderflächen (Extrusionsflächen) darstellt, und wies den Weg zu einem voll und ganz räumlichen Verständnis komplizierter Kurvengeometrien. Außerdem stellte er ausdrücklich fest, dass die korrekte Handhabung von Maschinen in der Geometrie unabdingbar ist, und vertrat die Überzeugung, dass die Beherrschung der räumlichen Geometrie ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung der französischen Maschinenindustrie sei.³⁰

Alle diese Erkenntnisse hatten unmittelbare Auswirkungen auf die Stereotomie (den Steinschnitt komplexer dreidimensionaler Körper) und auf den theoretischen Diskurs der projektiven Geometrie (die Darstellung dreidimensionaler Körper mittels linearer oder ebenflächiger Projektion). Monges Methoden ermutigten seine Zeitgenossen und Nachfolger dazu, die Beziehungen zwischen dem geometrischen Entwurfswissen und sämtlichen praktischen Arbeitsschritten im Bauwesen vom architektonischen Entwurf bis zur Konstruktion von Gebäuden, insbesondere beim Zimmern und Natursteinschneiden zu untersuchen. Im 19. Jahrhundert veröffentlichten Professoren, die zugleich Handwerksmeister waren – darunter Jean-Paul Douliot, Charles-François-Antoine Leroy, Louis Monduit und Louis Mazerolle – praktische Lehrbücher über Steinschnitt und projektive Geometrie. Architekten interessierten sich besonders für die gestalterischen Möglichkeiten, die ihnen diese neuartigen projektiven Oberflächen eröffneten, und machten die Oberflächengeometrie zu einem Gegenstand des Entwurfswissens.

Douliots *Traité spécial de coupe des pierres* (1825) verfolgt einen spezifisch taxonomischen Ansatz. Er klassifiziert darin die Arten von Oberflächen, die er für das Bauen am besten geeignet hält, darunter Regelflächen, das heißt Flächen, die durch die Bewegung einer erzeugenden Linie im Raum entstehen. Des Weiteren klassifiziert er einfach und

doppelt gekrümmte Flächen, Oberflächen von Zylindern und Kegeln, ellipsoide sowie andere, noch komplexer geformte Arten von Flächen. Da sein *Traité* aber als praktisches Lehrbuch über das Bauen gedacht war, beschreibt er darin ausführlich auch die für Wände geeigneten Flächen – ob lotrecht, zylindrisch geneigt oder konisch – und deren Zerlegung in Steine der jeweils geeigneten geometrischen Typologie.³¹ Ebenso ausführlich widmet er sich den Lösungen für die Erstellung von Kegelgewölben.³² Das Buch bietet eine bemerkenswerte Synthese der Grundlagen der Architektur im Hinblick auf Entwurf, Geometrie und Konstruktion. Im weiteren Verlauf des 19. Jahrhunderts bereicherten fortschrittliche konzeptuelle Techniken sowohl in der Geometrie als auch in der Technik des unregelmäßigen Natursteinschnitts und der Herstellung unregelmäßig geformter Holzteile das Formenvokabular der Architektur. Außerdem erschienen zahlreiche Lehr- und Handbücher für Architekten, darunter *Cours spécial d'architecture, ou Leçons particulières de géométrie descriptive* von C. Protot (1838). Etliche einschlägige Enzyklopädien wie *La science des artistes* (1844) enthalten Beiträge von Geometern und Architekten, die darin den damaligen Wissensstand der darstellenden Geometrie zusammenfassen. Andere Lehrbücher wurden speziell für Bauhandwerker geschrieben. Charles-François-Antoine Leroys *Traité de stéréotomie, comprenant des applications de la géométrie descriptive* (1844) erklärt zum Beispiel alle wesentlichen Steinschnitt- und Zimmerertechniken der Konstruktion komplexer Bauformen, einschließlich sogenannter Spiral- oder Spindelgewölbe.³³

Im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts waren diese Techniken im Bauwesen bereits allgemeine Praxis, und bei den Publikationen jener Zeit handelt es sich zumeist um grafische Vorzeigeobjekte. Monduits *Traité théorique et pratique de stéréométrie* (1889) präsentiert die anerkannten konstruktiven und

30 Monge 1989 [1799]: 4.

31 Douliot 1825: 59.

32 Douliot 1825: 149.

33 Leroy 1844: 64.

[Whitaker 2001: 175.] It probably represented the pinnacle of sophistication in the nineteenth-century construction of curve-generating devices. The Institut Poincaré in Paris archives one of the few known models.

With such machines, for the first time, calculating and drawing certain types of complex curves—such as the conic intersections between certain solid volumes, or the intersection of certain ruled surfaces—was a matter of simple mechanical operation.

Of course, the historical emergence of these machines was enabled by material developments of the industrial revolution in the nineteenth century; while some of the geometric principles underlying these machines had been articulated before, their precision reproduction required industrialization. Three manufacturing advances in particular made such machines possible. First, the industrial revolution precipitated a host of improvements in accuracy, repeatability, and scale that afforded a new level of complexity to machine instruments of all types. Artisanal machine tools from watch making were generalized to large-scale metal manufacturing, dramatically increasing the precision of the machining process. This repeatability made it possible for instrument makers to move beyond hand tools and embrace more automated instruments.⁴¹ This most basic repeatability was achieved only at the turn of the nineteenth century, however; a lathe to accurately and reliably thread screws was only invented in 1797.⁴² The further standardization of machine screws, essential to the development of precise compound machinery, was not substantially underway until the 1830s.

Second, the new precision in mechanical components enabled the compound motions necessary for the construction of more complex second-order machines. An example of a first-order machine is a compass. Once the radius is fixed, the compass has one degree of freedom, its angle of rotation. An example of a second-order machine is an ellipsograph, or more generally a spirograph. In such machines there are two interrelated compound motions, for instance when a primary rotation moves the

41 Morrison-Low 2007: 187.

42 Morrison-Low 2007: 188.

43 Morrison-Low 2007: 188.

stationary point for a second rotation. This second motion increases the required machining accuracy exponentially, since errors in the first motion will be magnified by the second. Higher-order machines of three or more interlocking motions are also possible, Suardi's geometrical pen being perhaps the clearest example. With the advent of accurate screws to control motion, a second compound motion dependent on the results of a first primary motion became precise and reliable. This compounding of motions can be repeated and amplified, but the application of such motions in a nested and recursive way to construct a new range of instruments was a technical leap.

Third, drawing instruments became increasingly associated with calculation and not only conception. They became devices to analyze design, not simply to record design. New machines to calculate quantities directly from drawings afforded new control over sophisticated designs. These machines became a sort of encapsulated knowledge base, able to rapidly follow the rules of certain calculations without the full comprehension of these rules by the user. The new emphasis on heuristics meant that a whole series of allied disciplines could benefit from the solution of related problems in another, through the use of machines. As Alison Morrison-Low writes: "As problems were solved in one industry, it was immediately realized that the solution was applicable in another where there was a close technical relationship; and it was transmitted to them through the machine tool industry, which 'may be looked upon as constituting a pool or reservoir of skills and technical knowledge which are employed throughout the entire machine-using sectors of the economy.'"⁴³

A particularly fascinating example of this type of calculating machine is a series of instruments that translated ideas from differential calculus, such as polar integration, into the mechanical motions of tools. This class of tools, known collectively as planimeters, was invented by the Swiss mathematician

diskretisierten Lösungen zahlreicher grundlegender geometrischer Aufgabenstellungen, einschließlich der Verschneidung von Zylindern und Kegeln. Vielleicht stellt diese Abhandlung das überzeugendste Beispiel für das Ausmaß geometrischer Raffinesse dar, die im 19. Jahrhundert für die Berechnung und Errichtung bautechnisch und künstlerisch anspruchsvoller Konstruktionen (speziell Gewölbe) erforderlich war. Mazerolles *Traité théorique et pratique de charpente* (1895) ergänzt Monduits Werk in vielerlei Hinsicht. Er führt darin die standardmäßigen, aber komplizierten projektiven und stereotomen Verfahren der Verformung von Schalungsbrettern auf der Basis volumetrischer Überschneidungen auf, aus denen sich Schalungsdiagramme für komplexe Dachkonstruktionen ableiten lassen. Mazerolle beschrieb außerdem schlüssige Methoden der Darstellung gebogener Holzbalken, die vielfach das unvermeidliche Ergebnis volumetrischer Überschneidungen sind. In gewisser Weise sind seine Konstruktionen aus Holz noch raffinierter als die aus Naturstein. Insgesamt betrachtet, entsprechen die genannten Publikationen über Zimmerer- und Steinschnitt den Höhepunkt des geometrischen Wissens im Handwerk des 19. Jahrhundert.

Die Erweiterung des Geometriewissens hatte direkte, weitreichende Auswirkungen auf das Bauen des 19. Jahrhunderts. Wohl kein anderer Architekt hat die projektiven und flächenbasierten Methoden mit eindrucksvollerer Wirkung angewandt als Antoni Gaudí beim Entwurf der heute noch unvollendeten Kirche Sagrada Família in Barcelona (Baubeginn: 1882). Gaudís Lehrer in projektiver Geometrie hatte bei Monge studiert, war Anhänger von dessen mathematischer Entwurfslehre und brachte demgemäß seinen Studenten bei, wie man Regelflächen und Flächenüberschneidungen für den Entwurf von Räumen nutzt.³⁴ Fast alle Räume der Sagrada Família hat Gaudí daher unter Einsatz von Regelflächen gebildet. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel ist eine Reihe von Fensteröffnungen: Sie sind von Laibungen in Form von Rotationshyperbeln eingerahmt, deren Überschneidungen zu projizierten Ellipsen zusammengefügt werden können.³⁵

Gaudís Werk ist zwar einerseits außergewöhnlich, andererseits aber auch charakteristisch für den Einsatz eines höheren Geometriewissens, das im ausgehenden 19. Jahrhundert in der Architektur zur Anwendung kam.

Die Werke von Monge und seinen Nachfolgern erweiterten das Architekturwissen um ein Vielfaches, erzeugten aber auch Bedarf an neuen technischen Geräten für Architekten, die deren Methoden anwenden wollten. Die von Monge propagierten Entwurfsverfahren erforderten mathematische Genauigkeit, und die Anfertigung der entsprechenden Zeichnungen wäre ohne mechanische Zeichengeräte sehr schwierig und zeitaufwendig gewesen. Die geometrische Projektion erforderte immer wieder zahlreiche zusätzliche Ansichten aus verschiedenen, auch schrägen Blickwinkeln, und dazu brauchte man mechanische Kompass. Das Zeichnen von Kurvengeometrien war noch arbeitsintensiver und erforderte häufig Punkt-für-Punkt-Projektionen und Interpolationen – selbst für einfachste Kurven. Außerdem ließen sich viele der gekrümmten oder überschrittenen Formen, die durch Projektionen entstanden waren, viel besser maschinell zeichnen, was schneller ging und präziser war als Punkt-für-Punkt-Projektionen. Komplexe Ansprüche an den Entwurf trugen im 19. Jahrhundert also zum Bedarf an Maschinen bei, die diese geometrischen Arbeitsschritte auf einfache und wiederholbare Weise ausführen konnten. Letzten Endes führte dies zur Notwendigkeit, mittels der Maschine Entwurfswissen in Instrumentenwissen umzuwandeln.

Wissens-Maschinen des 19. Jahrhunderts

Neuentwicklungen auf dem Gebiet geometrischer Darstellungsweisen verursachten also den dringenden Bedarf an Werkzeugen, mit denen entwerfende Architekten komplexe geometrische Darstellungen wie Perspektiven oder Überschneidungen rasch – fast algorithmisch – anfertigen konnten. Die Konstruktion von Kegelschnitten (Ellipsen, Parabeln,

34 Burry/Coll Grifoll/Gomez Serrano 2008: 18.

35 Burry/Coll Grifoll/Gomez Serrano 2008: 70.

Jakob Amsler-Laffon in 1854, and was based on certain boundary line integrals.⁴⁴ Amsler's planimeter could be used to mechanize the process of determining the area of non-standard figures by simply tracing the outline of a curve and calculating the area through a series of interrelated counting dials.⁴⁵

Planimeters enjoyed robust sales among engineers, architects, and planners into the early twentieth century, Amsler himself selling many thousands of units.⁴⁶ Amsler went on to develop more sophisticated iterations of this planimeter, including a version that could calculate spherical areas. So compelling were these new mechanical instruments for integration that in the second half of the nineteenth century even the illustrious physicist James Clerk Maxwell, author of the synthetic electromagnetic theory, was proposing his own variations on it.⁴⁷ Just as differential calculus had sublimated arithmetic operations to continuous analysis, these new machines allowed the control and analysis of a new scope of nonstandard forms and volumes.

The result of these three technological developments was a range of machines that each encapsulated specific advanced geometric procedures, with particular implications for design. Devices such as elliptical and semi-elliptical trammels automated the design of eccentric arches.⁴⁸ The ellipsograph encapsulated design knowledge that provided an exact way to represent the intersection of cylinders of equal radii. Such machines became standard enough that technical treatises began to recommend the use of the ellipsograph in design.⁴⁹ Some of the most sophisticated instruments addressed design problems from antiquity. The precise proportions and curves that describe the classical orders, for example, were a matter of rigorous and laborious precision.⁵⁰ As such, they were ideal for mechanization. Helicographs encapsulated the surprisingly complex design rules of ionic columns and certain types of staircases. And conchoidographs captured the equally complex design knowledge needed to describe exactly classically proportioned columns. In a sense, these tools were like

- 44 Stanley 1878: 249.
- 45 Stanley 1878: 249.
- 46 Murray 1898: 188.
- 47 Thomson 1875/76: 262.
- 48 Stanley 1878: 68.
- 49 Ashpittel 1867: 183.
- 50 Carpo 2003: 448.
- 51 Lee 1995: 171.
- 52 Hambly 1988: 91.
- 53 Lee 1995: 173.

custom software applications for each of these specific design problems. They augmented the forms conceivable by the architect, and systematized the use of complex curves within design.

The knowledge underlying geometric constructions as well as the mechanical means for their execution evolved profoundly during the nineteenth century. Through the expansion of geometric understanding of second-degree curves, such as conic sections, and of surfaces, such as ruled and extrusion surfaces, architects, engineers, scientists, and draftsmen created new demand for what were essentially computation machines for the calculation of spatial forms. Design and geometric knowledge was encapsulated in instruments, and this encapsulated knowledge enabled the more facile articulation of complex projective forms. Increasingly sophisticated machines in turn were put to use in the drawing machine industry itself, elevated the industry that created them, making new applications possible and allowing the design of yet more sophisticated machines.

The porosity between drafting and scientific instrumentation and their interdependence in cycles of innovation is exemplified by Joseph Clement, a well-known draftsman and one of the foremost makers of precision instruments in nineteenth-century Britain.⁵¹ Clement won national recognition for the design of mechanical drawing instruments, particularly those for the construction of ellipses, and worked extensively on the manufacture of automatic machine tools.⁵² But his most remarkable collaboration was in the construction of Charles Babbage's difference engine, the first large-scale mechanical computation device, between 1824 and 1833.⁵³ As the principal engineer behind its execution, Clement drafted and planned the

Hyperbeln) war von besonderer Bedeutung, da diese überall vorkommen und die Flächenüberschneidungen und Projektionen von noch viel komplizierteren Gebilden darstellen. Der englische Geologe und Schriftsteller John Farey erfand 1813 eines der ersten bahnbrechenden mechanischen Instrumente für das Zeichnen von Ellipsen,³⁶ das als Ellipsograf bekannt wurden und eine regelmäßigere, geregeltere Abänderung von Ellipsen ermöglichte als frühere Verfahren. Insbesondere erlaubten sie die Konstruktion von Figuren mit einer größeren Bandbreite an Haupt- und Nebenachsen als die klassischen Ellipsenzirkel es ermöglichten. Schon bald kamen weitere Instrumente auf, mit denen andere, komplexere Kurven erzeugt werden konnten, von denen viele in der Architektur zum Einsatz kamen. F. C. Penrose führte 1850 verschiedene Varianten des Helikografen zur Darstellung logarithmischer Spiralen (zum Beispiel Voluten ionischer Säulen oder Spirallinien einer Wendeltreppe) ein und ließ sie patentieren.³⁷ Im Folgenden erfand der englische Mechaniker William Ford Stanley seinen *conchoidograph* zur Darstellung des Profils klassischer Säulen, wobei das Instrument auf den Prinzipien beruhte, die Suardi bereits ein Jahrhundert früher ausgeführt hatte.³⁸ Stanley war besonders produktiv und entwickelte Ellipsografen, Konchoidografen (Muschelkurvenzirkel) und verschiedene Spirografen für komplexe Kurven sowie Pantografen für die interaktive mechanische Vervielfältigung von Zeichnungen. Auch Architekten bauten Instrumente, zum Beispiel der Engländer Edward Burstow, der 1871 einen hoch leistungsfähigen Ellipsografen konstruierte, den Zeitgenossen für den besten hielten.³⁹ Stanley passte Bustows Entwurf für seine eigenen Ellipsografen an, die er später herstellen ließ.⁴⁰

Die vielleicht fortgeschrittenste dieser Maschinen war der *clampylograph*, der um 1900 von dem Physiker und Meteorologen Marc Dechevrens entwickelt wurde. Dieses Gerät verband mehrere Teilbewegungen aber konnte eine großes Spektrum an Kurven, über 979 verschiedene Formen, inklusive aller konischen Schnitte und eine Reihe von

Zykloiden und Epizykloiden, replizieren. [Whitaker 2001: 175.] Das Gerät stellte möglicherweise den Höhepunkt der Verfeinerung im Bau von kurvengenerierenden Geräten im 19. Jahrhundert dar. Das Institut Poincaré in Paris verfügt über eines der wenigen bekannten Exemplare.

Derartige Maschinen machten die Berechnung und Anfertigung von Zeichnungen bestimmter komplexer Kurven, zum Beispiel der Überschneidungskurven von massiven Körpern oder bestimmter Regelflächen, zu einer einfachen mechanischen Arbeit. Natürlich war der Siegeszug dieser Geräte erst durch die Industrialisierung des 19. Jahrhunderts möglich geworden. Während einige der geometrischen Prinzipien, die diesen Maschinen zu Grunde lagen, schon früher benannt worden waren, ermöglichte erst die Industrialisierung deren präzise Vervielfältigung. Besonders drei fortschrittliche Entwicklungen waren dafür verantwortlich. Erstens beschleunigte die Industrialisierung eine Fülle von Verbesserungen im Hinblick auf Präzision, Wiederholbarkeit und Produktionsmengen, was zur Folge hatte, dass mechanische Geräte aller Art wesentlich komplexer wurden. Uhrmacherwerkzeuge wurden für die Massenfertigung von Metallwaren in Produktionsmaschinen „übersetzt“, was die Präzision der maschinellen Fertigung erheblich steigerte. Die Wiederholbarkeit machte es möglich, dass Werkzeugmacher und Gerätebauer nun nicht nur Handwerkzeuge sondern auch mechanisch-automatische Werkzeuge einsetzen konnten.⁴¹ In ihrer Grundform setzte sich die serielle Fertigung allerdings erst um die Wende zum 19. Jahrhundert allgemein durch. Eine Drehbank, auf der man Schraubengewinde präzise schneiden konnte, wurde zum Beispiel erst 1797 erfunden.⁴²

36 Piedmont-Palladino 2007: 42.

37 Stanley 1878: 77; ICE 1851: 245.

38 Stanley 1878: 85.

39 Stanley 1878: 72.

40 Ein herausragendes Beispiel einer solchen Maschine befindet sich in der Harvard Collection of Historical Scientific Instruments, Inventory 5120.

41 Morrison-Low 2007: 187.

42 Morrison-Low 2007: 188.

interworkings of hundreds of high-precision machined components. Babbage's project to create a machine for the automatic mechanical calculation of logarithm tables marks the most ambitious and systematic attempt at automatic computation, and prefigures in many ways the digital computers of today. It is remarkable that at the center of the project was a draftsman who was intimately involved in the creation of drawing machines for complex curves.

In this way, the development of complex drawing instruments in the early nineteenth century enabled the design of the first mechanical computer. This mechanical computer was part of a larger trend, exemplified among others by Amsler's planimeters, of simultaneously mechanizing and spatializing calculus-based computation. Although Babbage's machine is perhaps the most spectacular example, it is interesting to note that many contemporaries also saw the value of mechanizing computation, and that some of the resulting devices functioned in the service of design, planning, and architecture. It is not an exaggeration to say that the impulse to design ever more complex curves and develop the related drawing machines engendered the knowledge required to design a large-scale mechanical computation device.

Conclusion: Machine Epistemology and its Disruptions

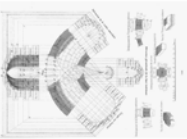
The nineteenth century saw an explosion of design knowledge in the form of new geometric methods, which in turn were enabled by geometric knowledge encapsulated in particular drawing and analytic machines. Encapsulated within these machines, this geometric knowledge could be simulated by the user through the instrumental knowledge of machine use. This created a much more efficient and reliable way to access this knowledge, but also created a certain reliance on the machine itself.

The case of the nineteenth-century drawing machines illustrates that advances in design knowledge and instrumental knowledge are often complementary, even symbiotic: one enables the understanding and expansion of the other. Design knowledge

and, more particularly, geometric knowledge, drive the need for new tools, and these new tools in turn allow the discovery or creation of more advanced design knowledge. Similarly, in our time, advanced geometry software has been the catalyst for the introduction of many particular concepts that were once considered outside the realm of design: surface geometry, mathematical parametrics, even aspects of process control and automation. In effect this dialog between geometry and machine has fundamentally expanded design knowledge.

Of course a potential risk of this view is that once design knowledge has been encapsulated in a machine process, access to it becomes dependant on both instrumental knowledge of the machine and on the machine itself. The tool and the knowledge that it encapsulates enable or disable the designer in the act of design. A loss of knowledge about a particular instrumental machine operation could very well mean loss of access to the utility of the underlying knowledge, particularly if this knowledge is highly specialized and not readily available in the architectural community itself. This is the case with some particularly complex geometric constructions, which are the purview of mathematical specialists; if the instrumental knowledge were lost, there would be no comparably advanced geometric knowledge to replace the loss. In short, after its transition from design knowledge to instrumental knowledge, instrumental knowledge becomes fundamental to the process of design itself and thus integral to architectural knowledge.

A loss of instrumental knowledge can be induced in many ways, not the least of which is a change in designers' attitudes and tastes. I argue that the advent of early twentieth-century modernism induced just such a change. It marginalized the remarkable nineteenth-century developments of complex drawing instruments by understanding the value of the machine in architecture in a fundamentally altered way.



Nineteenth-century projective geometry introduces complex new geometric and spatial manipulations, including the construction of complex curves. Construction is largely a manual process. Here, a plate from Mondoult's treatise.



Drawing instruments for the design of complex curves begin to be produced in industrial quantities, and new types of machines appear. Here, an ellipsograph from the Harvard Collection of Scientific Instruments.



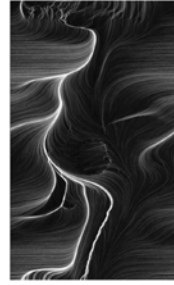
Sophisticated machinery such as calculation devices require increasingly intricate solutions, including the mapping of mechanical motions as compound curves. The technology for drawing these curves is at the same level of precision and control as is necessary for the construction of mechanical computing devices. Here, a prototype of Babbage's difference engine, which benefited from the work of engineers who had also built drawing devices for complex curves. Image: Science Museum, London.



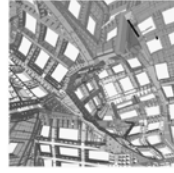
Mechanical computers evolve into electromechanical devices, and the first CAD systems for internalizing graphic representation emerge. Engineers engage the computer as a form rationalization tool. Here, the GAMIB DAC-1, one of the first such graphical interfaces for design. Image: Krull 2004.



At the same time, artists engage the computer as form generator, in some cases repurposing the mechanical drawing logics of nineteenth-century instruments. Here, a machine of Desmond Paul Henry and a Henry drawing produced by machine. Images: Desmond Paul Henry Archive.



Architects begin to comprehensively appropriate the computer for form generation, form rationalization, and construction control, reclaiming some of the nineteenth-century interest in precise geometry and the epistemic consequences of mechanical operations of design. Here, an image from the Lou Ruvo Brain Institute, a Gehry Partners project.



Die projektive Geometrie des 19. Jahrhunderts umfasst komplexe geometrische und räumliche Manipulationen. Diese beinhalten die Konstruktion komplexer Kurven, die hauptsächlich von Hand ausgeführt werden. Hier: eine Tafel aus Louis Mondoult's Lehrbuch.

Zeicheninstrumente für den Entwurf komplexer Kurven werden industriell und in großen Mengen gefertigt. Neue Maschinen entstehen. Hier: ein Ellipsograph aus der Harvard Collection of Scientific Instruments.

Hochentwickelte Maschinen wie Rechengeräte verlangen nach zunehmend komplexen Lösungen, unter anderem mechanischen Bewegungen als zusammengesetzte Kurven. Die Technologie, um diese Kurven zu zeichnen, verlangt den gleichen Grad an Präzision und Kontrolle wie die Konstruktion mechanischer Rechenmaschinen. Hier: ein Prototyp von Babbages *difference engine*, die wesentlich von der Arbeit von Ingenieuren profitierte, die auch Zeichengeräte für komplexe Kurven entwickelt hatten. Abbildung: Science Museum, London.

Mechanische Computer werden durch elektromechanische Apparate abgelöst. Die ersten CAD-Systeme zur integrierten grafischen Darstellung entstehen. Ingenieure setzen den Computer als Werkzeug zur Formrationalisierung ein. Hier: ein Bild des GAMIB DAC-1, einer der ersten solchen für den Entwurfsprozess geeigneten Schnittstellen. Abbildung: Krull 2004.

Zeitgleich benutzen Künstler den Rechner als Formgenerators. In manchen Fällen werden die Logiken der mechanischen Zeicheninstrumente des 19. Jahrhunderts dafür neu eingesetzt. Hier: eine Maschine von Desmond Paul Henry und eine maschinengenerierte Zeichnung Henrys. Abbildungen: Desmond Paul Henry Archive.

Architekten beginnen, den Computer umfassend zur Formgenerierung und -rationalisierung sowie zur Kontrolle der Bauausführung einzusetzen. Dabei knüpfen sie an das im 19. Jahrhundert gewachsene Interesse an präziser Geometrie und an den epistemischen Konsequenzen mechanischer Operationen im Entwurf an. Hier: eine Darstellung des Lou Ruvo Brain Institute, ein Projekt von Gehry Partners.

Ellipsenzeichner
Seit der Antike

Dieses Instrument zeichnet Ellipsen, deren Haupt- und Nebenachsen nicht kleiner sind als die Kreuzform des Instrumentenfußes. Dieser Ellipsenzeichner lässt in verschiedenen Varianten ohne Einsatz von Maschinenwerkzeugen anfertigen. Mit Ellipsen werden Gewölbeverschnidungen sowie Überschneidungen von zylindrischen Extrusionen und Flächen sowie bestimmte Bogenformen dargestellt.

Ellipsograf
1813 (hier John Fareys Modell)

Mit diesem Gerät zeichnet man Ellipsen, deren Haupt- und Nebenachsen unendlich klein sein können. Ellipsografen (auch Elliptografen genannt) wurden im 19. Jahrhundert ständig weiter entwickelt. Mit Ellipsen werden Gewölbeverschnidungen sowie Überschneidungen von zylindrischen Extrusionen und Flächen sowie bestimmte Bogenformen dargestellt.

Helikograf
1850 (hier Penrose und Bennets Modell)

Dieses Instrument zeichnet Nicomedische Spiralen, bei denen die sich nach außen bewegenden Spirallinien immer im gleichen Abstand vom nächstinneren Zykel verlaufen. Mit Hilfe dieses Geräts ließen sich die Spiralkurven ionischer Säulenkapitelle darstellen. Helikografen waren spätestens seit 1791 in Gebrauch, wurden aber im 19. Jahrhundert ständig weiter entwickelt.

Planimeter
1854 (hier Jakob Amsler-Laffons Modell)

Mit diesem Instrument werden die Flächeninhalte unregelmäßig begrenzter Areale berechnet. Wenn man mit dem Fahrstift eine geschlossene Kurve zieht, wird die davon umschlossene Fläche zeitgleich vom Messrad mechanisch integriert.

Konchoidograf
1866 (hier Fabrikat von William Ford Stanley)

Mit diesem Muschelkurvenzirkel werden Nicomedische Konchoide gezeichnet. Konchoide werden unter anderem dazu benutzt, vertikale Profile und zum Beispiel die Kannellierung klassischer Säulen darzustellen. Laut Nicomedes haben die Säulen des Pantheons konchoide Profile.

Elliptical Trammel
Since antiquity

This instrument traces an ellipse whose major and minor axes are no smaller than the cross frame that forms the base of the instrument. Variations of this instrument can be readily constructed without machine tools. Ellipses are used to describe vault intersections and intersections of cylindrical extrusions with planes, as well as certain types of arches.

Ellipsograph
1813 (Farey model shown)

This instrument traces an ellipse whose major and minor axes may be infinitely small. Ellipsographs (or alternatively, elliptographs) were under constant evolution during the nineteenth century. Ellipses are used to describe vault intersections and intersections of cylindrical extrusions with planes, as well as certain types of arches.

Helicograph
1850 (Penrose and Bennet model shown)

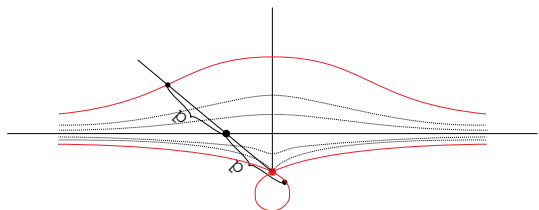
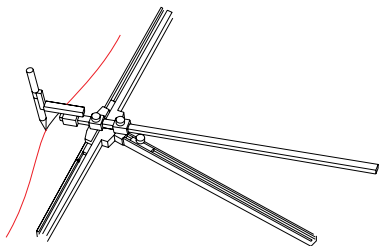
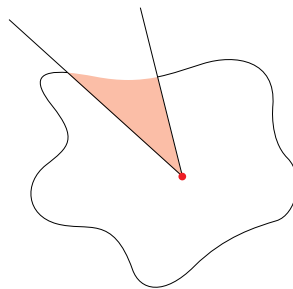
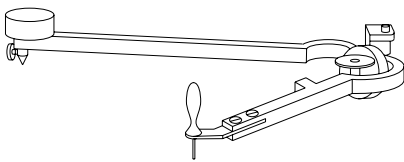
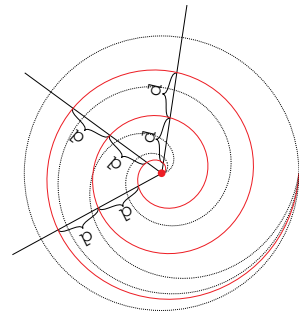
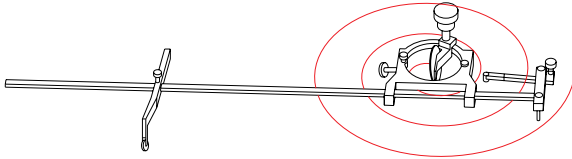
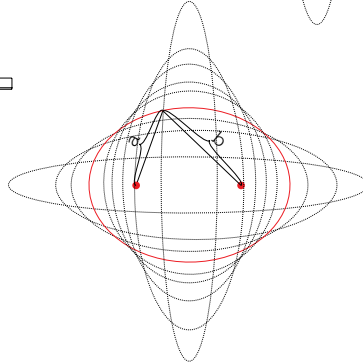
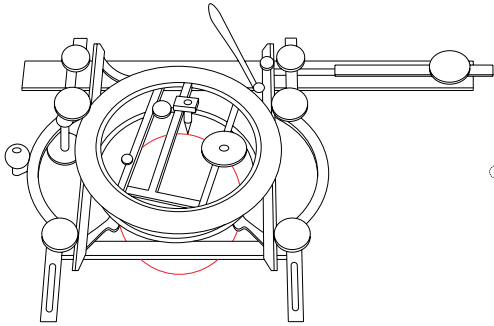
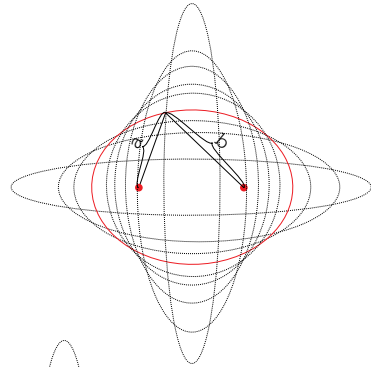
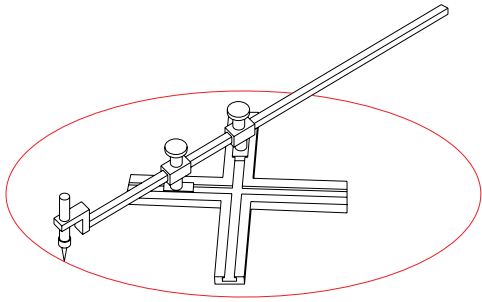
This instrument traces a spiral of Nicomedes. This spiral is such that each successive outward cycle of the spiral is equidistant from the next interior cycle. These curves are used to describe the traces of Ionic column capitals. Such instruments existed since at least 1791, although they also evolved continuously during the nineteenth century.

Planimeter
1854 (Jakob Amsler-Laffon model shown)

This instrument calculates the area of a planar region with an irregular boundary. Through the tracing of a closed curve with the planimeter, an accumulator wheel mechanically integrates the area bounded by the closed curve.

Conchoidograph
1866 (William Ford Stanley model shown)

This instrument traces a conchoid of Nicomedes. Conchoids are used in the description of the vertical profiles of classical columns or their fluting, among other uses. According to Nicomedes, the columns of the Pantheon have profiles which are conchoids.

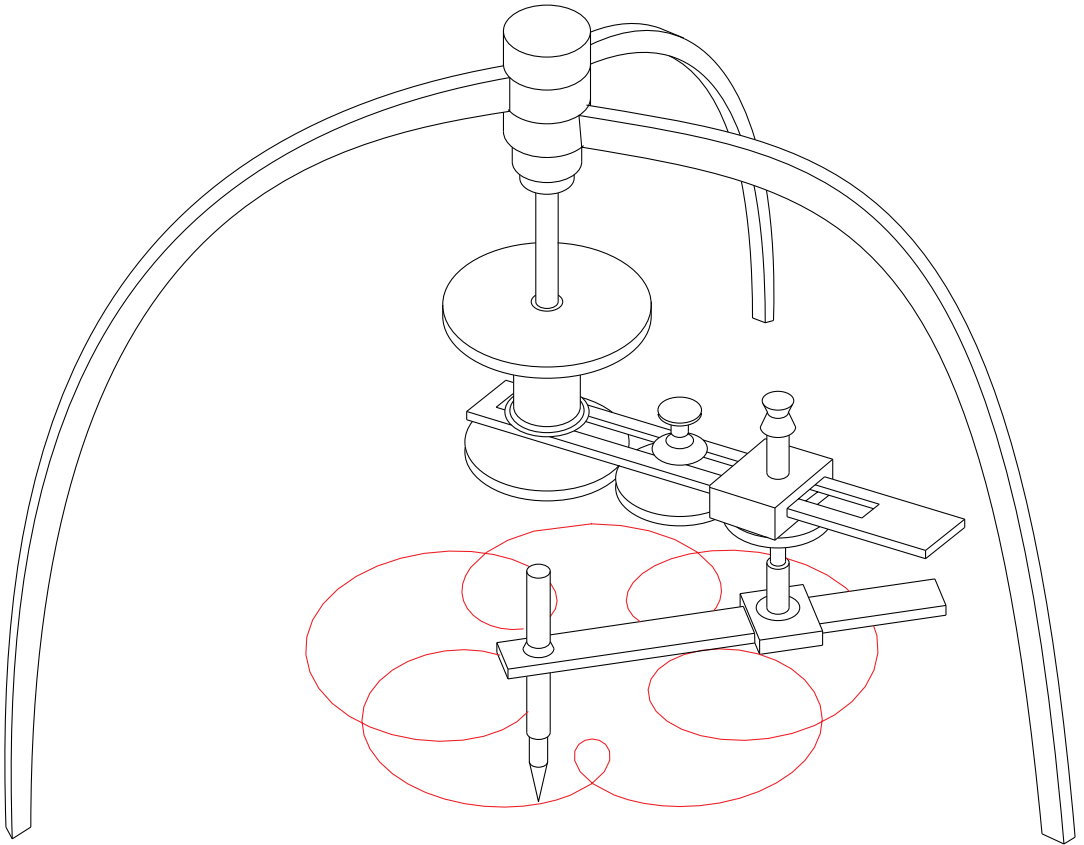


Suardis „geometrischer Schreiber“

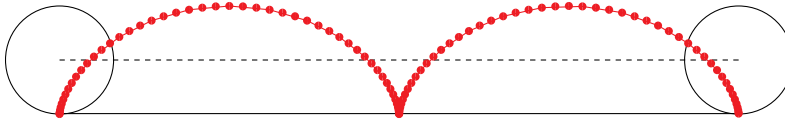
Der „geometrische Schreiber“ wurde 1750 vom Italiener Giambattista Suardi entwickelt und ist ein Vorläufer zahlreicher späterer Zeichengeräte für komplexe Kurven, insbesondere für den Einsatz mehrerer miteinander verbundener Teilbewegungen. Siehe auch Seite 79.

Suardi's Geometrical Pen

The geometrical pen (1750) was an instrument designed by the Italian Giambattista Suardi. This geometrical pen anticipated many of the later developments in instruments for drawing complex curves, including notably the employment of compound motion. See also page 79.

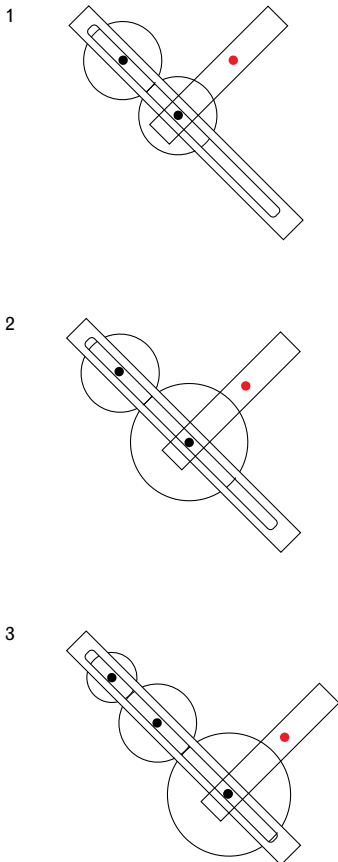


Bei den vom „geometrischen Schreiber“ gezogenen Kurven handelt es sich um Verallgemeinerungen einer Kurvenfamilie, die man Zykloide nennt. Im Allgemeinen ist eine Zykloide (oder zyklische Kurve) die Spur, die ein auf einem Kreis festgelegter Punkt hinterlässt, wenn der Kreis etwa – wie unten dargestellt – auf einer geraden Linie entlang rollt. Die abgebildete, einfachste zyklische Kurve nennt man eine gewöhnliche Zykloide.



Verschiedene Einstellungen des „geometrischen Schreibers“. Weitere Einstellungen mit verschiedenen Radien sind möglich. Mit jeder Einstellung lässt sich eine andere Kurve zeichnen. Laut Suardi gibt es 1200 Kombinationsmöglichkeiten.

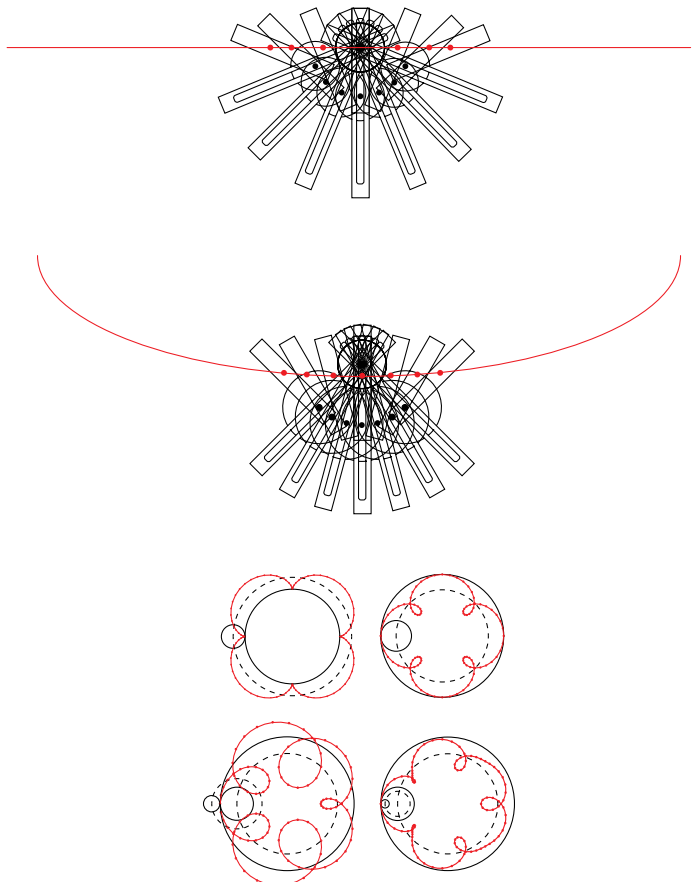
- 1 Zwei Einstellungen mit gleichem Radius: Gerade
- 2 Zwei Einstellungen mit ungleichen Radien: Ellipse
- 3 Drei Einstellungen: Zykloide und verschiedene Epizykloide



The curves traced by the geometrical pen are generalizations of the family of curves called cycloids. In general, a cycloid is the trace of a fixed point on the radius of a circle as it rolls continuously along a second curve. Below is the simplest cycloid, traced by a point on the circumference of a circle as it rolls along a line. This simplest cycloid is known as the right cycloid.

Below, the distinct gear configurations of the geometrical pen. The number of gears and the gear radii may be modified. Each gear configuration produces a different curve; Suardi claims over 1200 distinct combinatorial possibilities.

- 1 Two gears of equal radii: line
- 2 Two gears of unequal radii: ellipse
- 3 Three gears: cycloids and assorted epicycloids



Ellipsograf eines Architekten

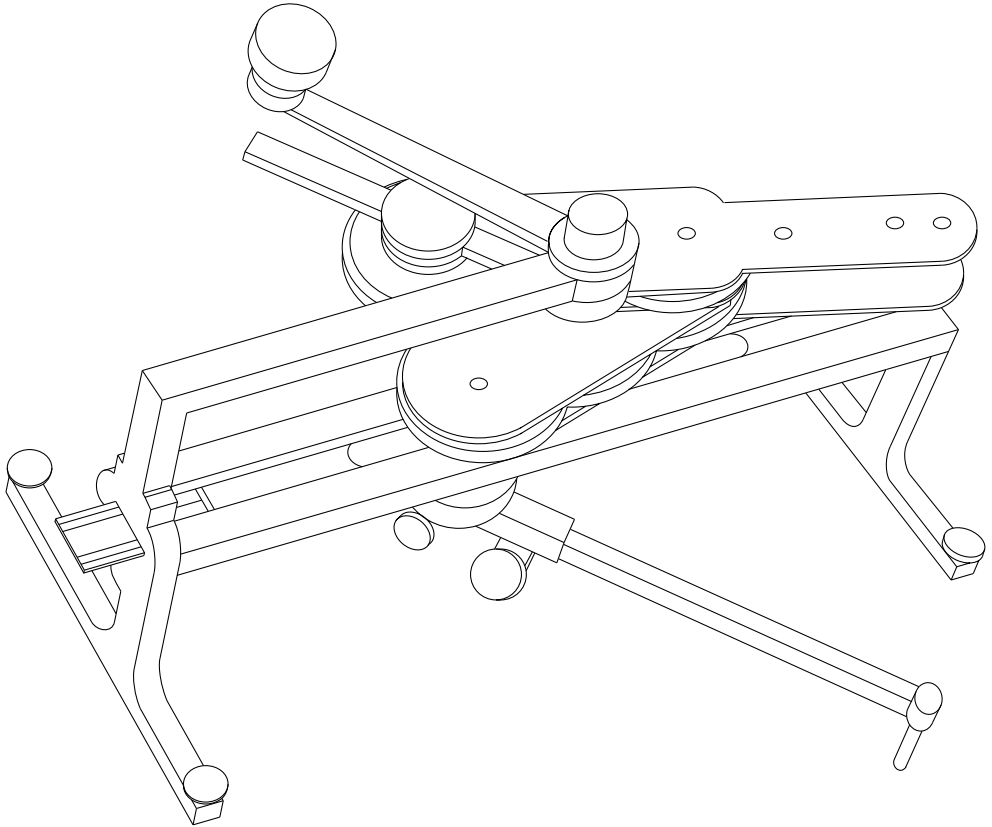
Architekten waren nicht nur Benutzer komplexer Zeicheninstrumente, sondern auch deren Designer. Dieser vom Architekten Edward Burstow entwickelte Ellipsograf von 1873 wurde serienmäßig von William Ford Stanleys Instrumentenfabrik hergestellt.

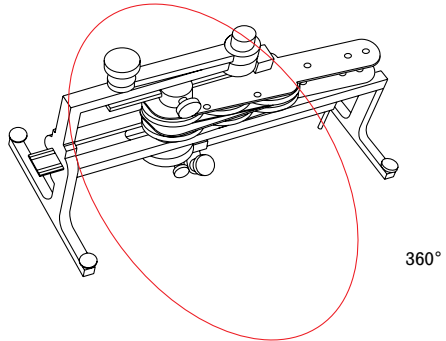
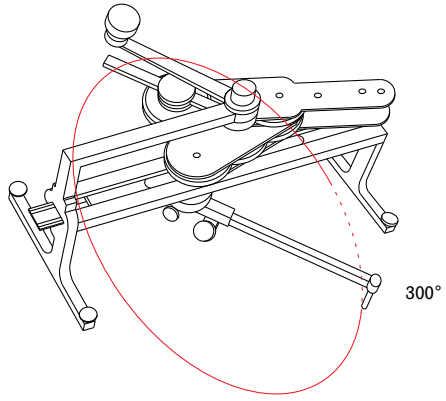
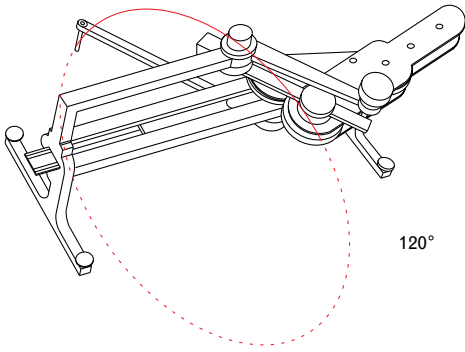
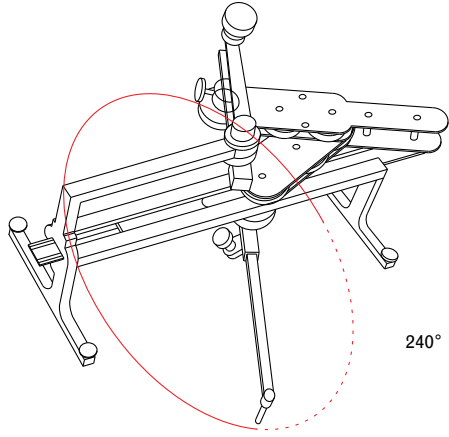
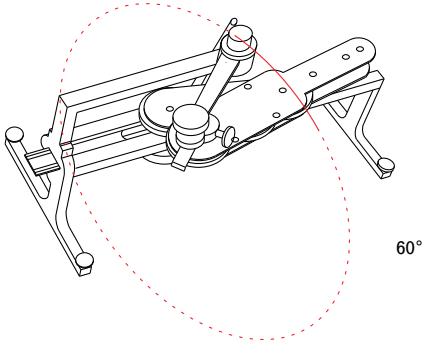
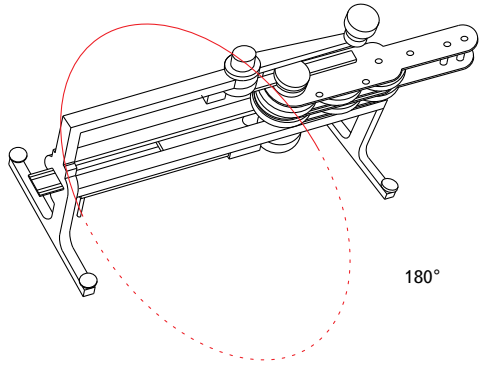
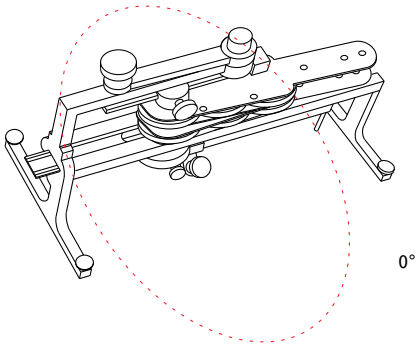
Um es zu benutzen, muss der Kurbelgriff oben auf dem Gerät erst um 360° – einmal ganz um die eigene Achse – gedreht werden. Je nach Winkelstellung der weiteren verstellbaren Teile zeichnet das Gerät verschiedene Ellipsenformen. Rechts: Beispiele der dynamischen Bewegungen dieses Ellipsografen. Siehe auch Seite 81.

An Architect's Ellipsograph

Architects were not only consumers of complex drawing instruments but designers of them as well. This design, dating to 1873, by the architect Edward Burstow, was produced commercially by William Ford Stanley's instruments company.

To operate, the user turns the topmost handle through 360 degrees, a full rotation. Various adjustable travels allow a continuous range of ellipses to be produced. At right, an example of the dynamic motion of this ellipsograph. See also page 81.





Die Standardisierung von Maschinenschrauben – eine unverzichtbare Maßnahme für die Entwicklung von Maschinen, die mehrere Operationen ausführten – erfolgte dagegen in beträchtlichem Umfang erst in den 1830er Jahren.

Zweitens ermöglichte die neue Präzision mechanischer Komponenten die Teilbewegungen, die eine Voraussetzung für den Bau komplexer Maschinen zweiter Ordnung darstellten. Ein Kompass ist zum Beispiel eine Maschine erster Ordnung. Wenn die Windrose erst einmal eingebaut und der Radius fixiert ist, kann die Kompassnadel sich nur auf dieser einen Ebene drehen, hat einen Freiheitsgrad, den Rotationswinkel. Beispiel für eine Maschine zweiter Ordnung ist der Ellipsograf beziehungsweise der Spirograf, weil er zwei voneinander abhängige Teilbewegungen ausführt, wenn eine primäre Drehbewegung den stationären Punkt verschiebt, um eine zweite Rotation zu erzeugen. Diese erhöht die erforderliche Präzision der Fertigung exponentiell, da Fehler in der ersten Bewegung von der zweiten deutlich vergrößert werden. Maschinen noch höherer Ordnung mit drei oder mehr verschränkten Bewegungen sind auch möglich; Suardis geometrischer Stift ist dafür möglicherweise das deutlichste Beispiel. Die Herstellung präziser Schrauben zur Regelung der Bewegungen führte dazu, dass die zweite Teilbewegung des Spirografen (die von der primären abhängig war) mit zuverlässiger Präzision erfolgen konnte. Die Verknüpfung von Bewegungen ließ sich wiederholen und amplifizieren, aber erst die Umsetzung mechanischer Teilbewegungen in geschachtelte, berechenbare Takteinheiten ermöglichte die Konstruktion ganz neuer Instrumente – was eine Revolution in der Entwicklung mechanischer Zeichengeräte auslöste.

Drittens verwandelten sich Zeichengeräte zunehmend in Bemessungshilfen, im Gegensatz zu früher, als sie konzeptionelle Arbeitsmittel waren. Mit den mechanischen Instrumenten konnte man Entwürfe nicht nur aufzeichnen, sondern auch auswerten, und mit den neuen Maschinen für die Ableitung von Mengenberechnungen aus Bauplä-

nen konnten anspruchsvolle Entwürfe besser geprüft werden. Entwurfs- und Zeichengeräte entwickelten sich demnach zu so etwas wie Datenbanken, die in der Lage waren, die Regeln bestimmter Rechenverfahren rasch zu befolgen, ohne dass der Benutzer diese Regeln voll verstehen musste. Eine neue Betonung der Heuristik bedeutete, dass eine ganze Reihe verwandter Disziplinen davon profitieren konnte, wenn ein gemeinsames oder analoges Problem in einem anderen Fachgebiet gelöst wurde, und zwar durch den Einsatz von Maschinen. Alison Morrison-Low schreibt: „Wenn in einem Industriezweig Lösungen für bestimmte Probleme gefunden wurden, erkannte man sofort, dass sie in einem anderen ebenfalls anwendbar waren, wenn zwischen beiden eine enge technische Beziehung bestand. Die Lösung wurde durch die Werkzeugmaschinenindustrie vermittelt, die als Reservoir an fachlichen Qualifikationen und technischen Kenntnissen gelten kann, welche in sämtlichen Wirtschaftszweigen, die Maschinen einsetzen, angewandt werden.“⁴³

Besonders faszinierende Beispiele dieser Art Rechenmaschinen ist eine Reihe von Instrumenten, welche die Konzepte der Differenzialrechnung (wie etwa die Integration von Polarkoordinaten) in die mechanischen Bewegungen von Werkzeugen übertragen. Diese Art Präzisionsinstrumente werden als Planimeter bezeichnet und basieren auf bestimmten Grenzlinienintegralen.⁴⁴ 1854 entwickelte der Schweizer Mathematiker Jakob Amsler-Laffon seinen sogenannten Polarplanimeter, mit dem sich der Flächeninhalt selbst ungewöhnlicher ebener Figuren durch Nachziehen der Grenzlinie mit einem „Fahrstift“ mittels einer Reihe zusammenhängender Zählscheiben an einer Skala ablesen ließ.⁴⁵ Bis ins frühe 20. Jahrhundert wurden Polarplanimeter von Ingenieuren, Architekten und Stadtplanern gerne gekauft. Amsler wurde Fabrikant und produzierte und verkaufte selbst viele Tausend Stück.⁴⁶

43 Morrison-Low 2007: 188

[Dt. Übers.: Annette Wiethüchter].

44 Stanley 1878: 249.

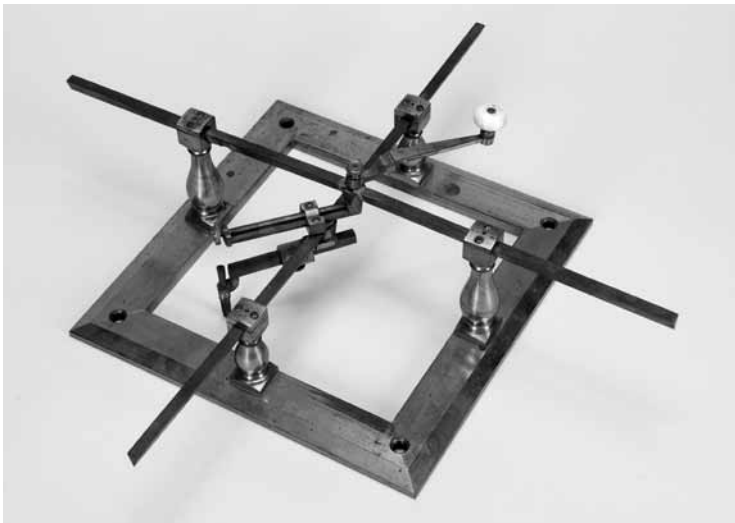
45 Stanley 1878: 249.

46 Murray 1898: 188.



Dieser Ellipsograf, der um 1813 hergestellt wurde, mit dem sich Kurven durch mechanische Teilbewegungen darstellen lassen, hat große Ähnlichkeit mit Giambattista Suardis „geometrischem Schreiber“.

This ellipsograph, dating to circa 1813, resembles closely the design proposed by Giambattista Suardi for a geometrical pen, capable of the description of curves of compound mechanical motion.



Dieser Ellipsograf, hergestellt zwischen 1850 und 1870, beruht auf einer relativ standardmäßigen Konstruktionsweise, die für serienmäßig produzierte Instrumente typisch gewesen wäre.

This ellipsograph, fabricated between 1850 and 1870, has a relatively standard design that would have been typical of large-scale production instruments.

Später entwickelte er seinen Polarplanimeter noch weiter und konstruierte unter anderem einen, mit dem sich Kugeloberflächengrößen ermitteln ließen. Diese neuen Flächenbemessungsinstrumente waren so gut, dass selbst der berühmte englische Physiker James Clerk Maxwell, Entdecker des synthetischen Elektromagnetismus, in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts seine eigenen, abgewandelten Versionen entwarf.⁴⁷ Die Differenzialrechnung hatte arithmetische Vorgänge in fortlaufende Berechnungen sublimer, und die neuen Maschinen ermöglichten in ähnlicher Weise die Kontrolle und Analyse einer neuen Gruppe unregelmäßiger Flächen- und Rauminhalte.

Diese drei technischen Entwicklungen führten zur Entwicklung einer Reihe von Maschinen, die verschiedene fortschrittliche, spezifische geometrische Mess- und Darstellungstechniken ermöglichten, die sich auf die architektonische Entwurfsarbeit auswirkten. Instrumente wie Ellipsen- und Halbellipsenzirkel erleichterten zum Beispiel die Entwicklung außermittiger Bögen⁴⁸ und der Ellipsograf verkörperte das Entwurfswissen über die genaue Darstellungsweise der Überschneidung von Zylindern mit gleichen Radien. Derartige Maschinen setzten sich weitgehend als Standard durch, und technische Abhandlungen empfahlen in der Folge den Einsatz von Ellipsografen bei der Entwurfsarbeit.⁴⁹ Mit Hilfe einiger höher entwickelter Instrumente ließen sich Entwurfsaufgaben lösen, die schon die antiken Baumeister beschäftigt hatten, zum Beispiel die mühevoll Bemessung der Proportionen und Kurven der klassischen Ordnungen, die absolute Präzision erforderte.⁵⁰ Von daher bot sich für diese Aufgabe die Mechanisierung an. Helikografen „enthielten“ die erstaunlich komplexen Regeln der Bemessung ionischer Säulen sowie bestimmter Treppenformen, und Konchoidografen das für den Entwurf klassischer Säulenproportionen erforderliche mathematische Wissen. Diese Instrumente entsprachen also in etwa unseren heutigen maßgeschneiderten Computeranwendungen für die genannten Entwurfsaufgaben. Sie erhöhten die Zahl der Formen, die der Architekt überhaupt entwer-

fen konnte, und systematisierten die Berechnung komplexer Kurven in der Architektur.

Das den Bauwerken innewohnende Geometriewissen und die mechanischen Geräte, mit deren Hilfe es konkrete Gestalt annahm, wurden im 19. Jahrhundert erheblich weiterentwickelt. Neue Erkenntnisse über Kurven zweiten Grades (etwa bei Kegelschnitten, Regel- und Extrusionsflächen) führten dazu, dass Architekten, Ingenieure, Wissenschaftler und technische Zeichner den Bedarf an mechanischen Geräten ankurbelten, die im Grunde Rechenmaschinen zur Bemessung dreidimensionaler Formen darstellten. Das in diesen Instrumenten gespeicherte Entwurfs- und Geometriewissen erleichterte die Gliederung komplexer architektonischer Projektionen. Auch die für die Fertigung höher entwickelter mechanischer Zeichengeräte erforderlichen Produktionsmaschinen wurden immer komplexer. Sie adelten den feinmechanischen Zweig der Maschinenbauindustrie und förderten neue Entwurfsmethoden und die Entwicklung immer komplizierterer Maschinen.

Joseph Clement, bekannter englischer technischer Zeichner und führender Präzisionswerkzeugmacher des 19. Jahrhunderts, steht für das Ineinandergreifen von architektonischem Entwurf und wissenschaftlichen Instrumenten sowie deren wechselseitige Abhängigkeit in Innovationszyklen.⁵¹ Clement machte sich einen Namen als Erfinder mechanischer Zeichengeräte, speziell für die Konstruktion von Ellipsen, und befasste sich eingehend mit der Entwicklung und Herstellung automatischer Maschinenwerkzeuge.⁵² Am bekanntesten wurde er jedoch durch seine Mitarbeit (von 1824 bis 1833) an Charles Babbages *difference engine*, der ersten mechanischen Rechenmaschine.⁵³ Als Chefindingenieur der Fabrikation entwarf und zeichnete Clement hierfür Hunderte der hoch präzisen maschinell gefertigten Komponenten. Babbages Projekt eines

47 Thomson 1875/76: 262.

48 Stanley 1878: 68.

49 Ashpittel 1867: 183.

50 Carpo 2003: 448.

51 Lee 1995: 171.

52 Hambly 1988: 91.

53 Lee 1995: 173.



Die Abbildung zeigt einen typischen Bustow'schen Ellipsografen, der nach 1873 in der Fabrik von William Ford Stanley hergestellt wurde.

This is a typical example of Bustow's ellipsograph, produced by William Ford Stanley after 1873.

It was the repeatability, speed, and mass productivity of machines, not the precision handling of calculation and geometric complexity, that captivated many architects of the interwar period. Le Corbusier's writing is only the most obvious example: "The lesson of the airplane is not primarily in the forms it has created, and above all we must learn to see in an airplane not a bird or a dragon-fly, but a machine for flying; the lesson of the airplane lies in the logic which governed the enunciation of the problem and which led to its successful realization."⁵⁴ It was the economic law of the machine even more than the formal one that was decisive.⁵⁵ While they adopted a certain economic or social ethic of progress through mechanization, an undeniably primitive formal tendency marginalized forms that architects assumed could not be easily reproduced, such as complex curves or hyperbolic and spherical forms. Since the forms themselves become the object of modern reaction, the tools used for their creation—this array of instruments that encap-

⁵⁴ Le Corbusier 1986 [1923]: 110.

⁵⁵ Le Corbusier 1986 [1923]: 227.

sulated fundamental geometric knowledge and ability—were superfluous to the aims of modernism. Thus the geometric knowledge embodied and encapsulated in these instruments was essentially lost to the profession.

This epistemic, formal, and technical rupture had lasting consequences. In fact there was a palpable absence of true curved geometric experimentation in the mainstream of design for essentially half a century. Ruled surfaces, subjects of explicit architectural study by Douliot as early as 1825, did not re-emerge in the architectural vocabulary until the 1950s with the work of Miguel Fisac, Marcel Breuer, and others, and then without the aid of advanced geometric drawing machines. Even sophisticated operations such as the subdivision of Buckminster Fuller's geodesic domes were undertaken largely without mechanical aid. These architects found themselves reinventing the notion of

Automaten zur Berechnung von Logarithmentafeln stellt den ehrgeizigsten systematischen Versuch in automatischer Berechnung seiner Zeit dar, weshalb seine Maschine als Vorläufer des heutigen digitalen Computers gilt. Interessanterweise war ein technischer Zeichner und Werkzeugmacher von Geräten zur Erstellung komplexer Kurven entscheidend an der Entstehung von Babbages Maschine beteiligt.

Die Entwicklung präziser mechanischer Zeicheninstrumente zu Beginn des 19. Jahrhunderts hatte also dem ersten mechanischen Computer den Weg gebahnt, und zwar als Teil der umfassenderen Entwicklung mechanisierender und zugleich raumbildender Bemessungen auf der Basis der Differenzial- und Integralrechnung, wie sie mit Amslers Planimetern ausgeführt werden konnten. Die *difference engine* von Charles Babbage ist zwar möglicherweise das spektakulärste Beispiel derartiger Erfindungen, viele seiner Zeitgenossen hatten aber ebenfalls den Wert automatischer Rechengерäte erkannt, und einige der resultierenden Geräte dienten planerischen und architektonischen Zwecken. Es ist nicht übertrieben zu behaupten, dass der Impuls, immer noch komplexere Kurven zu entwerfen und die dafür notwendigen Zeichenmaschinen zu entwickeln, das Wissen erzeugte, das für die Entwicklung großer mechanischer Rechenmaschinen nötig war.

Fazit: Die Epistemologie der Maschine und ihre Brüche

Man kann sagen, dass im 19. Jahrhundert das Wissen über geometrisch-gestalterische Vorgänge und neue Bemessungsmethoden geradezu explodierte und in den Bau spezieller Zeichen- und Berechnungsmaschinen einfluss. Das in diesen Instrumenten gespeicherte Geometriewissen konnte vom Benutzer aufgrund seines Instrumentenwissens – das heißt seiner Kenntnis der Maschinenfunktion und -handhabung – erschlossen werden (er konnte simulieren, das Wissen selbst zu haben), was ihm einen effizienteren und zuverlässigeren Zugang zu diesem Wissen verschaffte, ihn aber auch bewog, sich auf die Maschine zu verlassen.

Die mechanischen Zeichengeräte des 19. Jahrhunderts belegen, dass Fortschritte in architektonischem Entwurfswissen und bei der Beherrschung des dazugehörigen Instrumentenwissens sich vielfach gegenseitig ergänzen, ja sogar eine Symbiose eingehen. Beide Wissensarten ermöglichen das Verständnis und die Entwicklung der jeweils anderen. Das Entwurfswissen (speziell die Beherrschung der Geometrie) weckt den Bedarf an neuen Entwurfsinstrumenten, und diese Werkzeuge wiederum führen zur Entdeckung oder Schaffung von weiter fortgeschrittenem Entwurfswissen. In ähnlicher Weise hat in unserer Zeit Software für fortgeschrittene Geometrie die Einführung zahlreicher Konzepte beschleunigt, die früher nicht zum Bereich des architektonischen Entwurfs zählten, nämlich Oberflächengeometrien, mathematische Parametrien, ja sogar bestimmte Aspekte der Prozesssteuerung und -automation. Die Wechselbeziehung zwischen Geometrie und Maschine hat das Entwurfswissen grundlegend verändert und erweitert.

Natürlich birgt das auch ein Risiko: Ab dem Moment, in dem dieses Entwurfswissen in die Maschine eingespeichert wird, ist es nur noch den Nutzern zugänglich, die sowohl über das Instrumentenwissen in der Handhabung der Maschine als auch über die Maschine selbst verfügen. Das Werkzeug und das darin gespeicherte Wissen versetzen den Entwerfer in die Lage (oder eben auch nicht) zu gestalten. Verloren gegangenes Wissen über bestimmte maschinelle Vorgänge könnte sehr wohl den praktischen Nutzen des mechanischen Instruments beziehungsweise des in ihm enthaltenen Wissens zunichte machen, besonders wenn dieses hoch spezialisiert und ansonsten unter Architekten nicht allgemein verfügbar ist. Das ist bei etlichen hoch komplexen geometrischen Konstruktionen der Fall, die in den Bereich spezialisierter Mathematiker fallen. Wenn das Instrumentenwissen verloren ginge, gäbe es keinen vergleichbaren aktuellen Wissensstand in der Geometrie, mit dem der Verlust kompensiert werden könnte. Kurzum: Mit der Umwandlung von Entwurfswissen zu Instrumentenwissen wird Instrumentenwissen zur

the curved form in architecture, inventing geometric design knowledge that would have been enabled by a forgotten technology.

This rupture of continuity and loss of knowledge was avoidable. If instrumental knowledge and its formal implications had been understood as ideologically independent from formal design agendas, and instead had been candidly embraced as part of the knowledge culture of architecture, the formal limits of twentieth-century modernism would have been mitigated by an unbroken evolution of technical innovation through instrumental innovation. In other words, if instrumental knowledge had been seen as a fundamental part of architectural knowledge, the machine culture of architecture we see today could be properly understood as a part of a continuous evolution of the instrumental dimension of architectural knowledge. Our current epistemic debate would be fundamentally different.

Contemporary architects are again increasingly mechanizing and automating their approach to design. The pervasive use of digital technology in the conception and execution of buildings dramatically increases our reliance on representational and operational systems of which we have incomplete understanding but that we nevertheless trust implicitly. In this way there is a strong parallel to the developments of the nineteenth century: the facilitation and even diffusion of design by mechanical instrumentation opened rigorous formal possibilities partially through a mastery of instrumental mechanical methods, which required a reorganization of design pedagogy and ultimately, architectural knowledge.

The machine, particularly the computer, calls into question the self-understanding of architecture and its self-imposed alienation from technical processes. There is a strong tendency, arguably beginning with Alberti, to dichotomize design knowledge and instrumental knowledge, and to relegate technical or mechanical expertise to the domain of specialists or operators. Perhaps this can be explained by a mistrust of the architect's need to rely on mechanical, electrical, computational, or conceptual operations of which

the architect cannot have complete understanding. This trust in machines, however, far from being an innocent conceit, represents an implicit belief in the possibility that collective memory and design knowledge can be instrumentally encapsulated in machines. It represents not a barrier to advancement of architectural knowledge but a great opportunity. The power of knowledge encapsulation and automation is aptly summarized by mathematician Alfred North Whitehead when he claims: "It is a profoundly erroneous truism, repeated by all copy-books and by eminent people when they are making speeches, that we should cultivate the habit of thinking what we are doing. The precise opposite is the case. Civilization advances by extending the number of important operations which we can perform without thinking about them."⁵⁶

This understanding is of fundamental importance for the advancement of architectural epistemology: it implies that some design knowledge is ultimately modular, something that can be abstracted, encapsulated, trusted, mechanically represented, and propagated. To some extent design knowledge may be simulated by the use of instrumental knowledge of machines that can produce the same effects as the original design knowledge. In fact, the fluent use of machinery can produce architectural effects that may not come by any other form of design knowledge alone. Thus instrumental knowledge constitutes a positive and essential component of architectural knowledge. As a particular dimension of architectural knowledge, its loss, as in the first half of the twentieth century, is conversely a loss of architectural knowledge.

A new synthesis of design and instrumentality seems imminent within architecture: one that acknowledges the centrality of technique, geometry, and machine to design. We should properly welcome this shift as a new formal opportunity, a candid synthesis, and a new epistemic paradigm for architecture.

Grundlage des Entwurfsprozesses und somit zum integralen Bestandteil des Architekturwissens als Ganzes.

Dieses Instrumentenwissen kann auf vielerlei Weise verloren gehen, nicht zuletzt aufgrund veränderter Haltungen und ästhetischer Vorlieben der Architekten. Ich behaupte, dass das Neue Bauen zu Beginn des 20. Jahrhunderts einen solchen Verlust bewirkte. Mit ihrer grundlegend anderen Auffassung vom Wert der Maschine in der Architektur verdrängte und veränderte die Moderne die bemerkenswerten Entwicklungen des 19. Jahrhunderts auf dem Gebiet präziser mechanischer Zeichengeräte. Es waren die durch Maschinen möglich gewordene schnelle Reproduzierbarkeit und hohe Produktivität, die zahlreiche Architekten in der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen faszinierten. Der folgende Text von Le Corbusier ist nur das bekannteste Beispiel: „Die Lehre des Flugzeugs liegt nicht so sehr in den gestalteten Formen, und zuerst muß man lernen, in einem Flugzeug nicht einen Vogel oder eine Libelle zu sehen; es ist eine Maschine zum Fliegen. Die Lektion, die uns das Flugzeug erteilt, liegt in der Logik, aus der die Stellung des Problems erfolgte, und die Erfolg und Verwirklichung geleitet hat.“⁵⁴ Mehr noch als die formalen Gesetze waren die ökonomischen Gesetze der Maschine für Le Corbusier entscheidend.⁵⁵ Während sie bestimmte Aspekte des Glaubens an den wirtschaftlichen und sozialen Fortschritt durch die Mechanisierung übernahmen, verdrängten die Vertreter der Architekturmoderne mit ihren unverkennbar primitiven formalen Tendenzen andere Figuren und Formen, die sich ihrer Meinung nach nicht rationell serienmäßig reproduzieren ließen, nämlich komplexe Kurven, Hyperbeln oder gar Kugeln. Die Tatsache, dass Formen an sich zum Gegenstand der modernen Reaktion wurden, führte dazu, dass dem Berufsstand des Architekten die Mittel zu ihrer Erzeugung – das heißt, die vielen Instrumente, in denen die theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendungen der Geometrie gespeichert waren – abhanden kamen.

Dieser erkenntnistheoretische, formale und technische Bruch hatte weitreichende Folgen: Während fast eines halben Jahrhunderts gab es im architektonischen Mainstream keine ernsthaften kurvengeometrischen Experimente mehr. Regelflächen, die bereits 1825 Douliots Forschungsgegenstand gewesen waren, tauchten erst in den 1950er Jahren in den Projekten von Miguel Fisac, Marcel Breuer und anderen wieder auf, dann aber ohne Einsatz moderner mechanischer Zeichengeräte. Selbst die Strukturierung so hoch komplexer Oberflächen wie Buckminster Fullers geodätischer Kuppeln erfolgte weitgehend ohne mechanische Hilfsmittel. Diese Architekten mussten das Konzept der geschwungenen architektonischen Form also sozusagen ganz neu erfinden – einschließlich des geometrischen Wissens, das eine vergessene Technik ermöglicht hätte.

Dieser Bruch und Wissensverlust hätte vermieden werden können. Wenn das Instrumentenwissen und dessen formale Auswirkungen als ideologisch unabhängig von formalen Dogmen aufgefasst und offen als Teil der spezifisch architektonischen Wissenskultur anerkannt worden wären, hätte die formale Begrenztheit der Moderne des 20. Jahrhunderts durch die kontinuierliche Entwicklung bautechnischer Innovationen mit Hilfe instrumententechnischer Innovationen gemildert werden können. Anders gesagt: Wenn instrumentelles Wissen als fundamentaler Bestandteil des Architekturwissens gegolten hätte, könnte man die heutige Maschinenkultur der Architektur als Teil einer kontinuierlichen Entwicklung der instrumentellen Dimension des Architekturwissens richtig verstehen – und die aktuelle epistemologische Debatte sähe grundlegend anders aus.

Zunehmend mechanisieren und automatisieren zeitgenössische Architekten erneut die Entwurfsarbeit. Die Nutzung der digitalen Technologie bei der Konzeption und Ausführung von Gebäuden aller Art hat dazu geführt, dass Architekten sich heute in erheblichem Maße auf darstellende und

54 Le Corbusier 1963 [1923]: 89.

55 Le Corbusier 1963 [1923]: 166.

ausführende Systeme verlassen, die sie zwar nicht völlig verstehen, denen sie aber trotzdem unhinterfragt vertrauen. Das stellt eine starke Parallele zu den Entwicklungen mechanischer Zeichen- und Bemessungsinstrumente im 19. Jahrhundert dar, welche die Entwurfsarbeit erleichterten und neue Entwurfsmethoden förderten, indem sie dem entwerfenden Architekten neue formgebende Möglichkeiten eröffneten, wenn er die Instrumente kennen und handhaben lernte. Das erforderte Umstellungen der Lehre und – letztlich – des Architekturwissens.

Die Maschine – speziell der Computer – stellt das Selbstverständnis der Architektur und ihre selbstauferlegte Entfremdung von technischen Prozessen in Frage. Die Tendenz, das Entwurfswissen und das Instrumentenwissen auseinander zu dividieren und das Wissen auf dem Gebiet der Mechanik den Technikspezialisten und Bauausführenden zu überlassen, besteht seit Langem, möglicherweise schon seit Alberti. Das lässt sich vielleicht damit erklären, dass Architekten im Allgemeinen einer Abhängigkeit von mechanischen, elektrischen, rechnerischen oder konzeptionellen Verfahren, die sie nicht voll verstehen können, misstrauen. Weit davon entfernt, eine harmlose Einbildung zu sein, entspricht der Verlass auf die Maschine dem impliziten Glauben an die Möglichkeit, dass das kollektive entwerferische Gedächtnis und Wissen sich instrumentell in Maschinen speichern lässt. Das ist kein Hemmnis, sondern eine große Chance für die Weiterentwicklung des Architekturwissens. Alfred North Whitehead hat die Macht des in Maschinen gespeicherten und automatisierten Wissens treffend beschrieben: „Es ist eine weit verbreitete, aber völlig irriige Auffassung, die sich in allen Anleitungen findet und durch hervorragende Leute in Reden wiederholt wird, daß wir die Denkgewöhnung bei allem, was wir tun, pflegen müssen. Das genaue Gegenteil ist der Fall. Die Zivilisation schreitet vorwärts, indem sie die Zahl der wichtigen Operationen erhöht, die wir ohne zu denken ausführen können.“⁵⁶

Diese Auffassung ist von grundlegender Bedeutung für die Weiterentwicklung der architektonischen Epistemologie. Sie impli-

ziert, dass ein bestimmter Teil des Entwurfswissens letztlich modular ist, dass man es abstrahieren, speichern, mechanisch darstellen und vermehren kann und dass es verlässlich ist. Bis zu einem gewissen Grad lässt sich das Entwurfswissen simulieren, und zwar mittels der eigenen Kenntnis der zu dessen Anwendung erforderlichen Maschinen, so dass man damit die gleichen Resultate erzielen kann, die man auch ohne maschinelle Hilfsmittel erzielt hätte. Die theoretische und praktische Beherrschung von Maschinen kann in der Tat architektonische Effekte herbeiführen, die mit keiner anderen Form von Entwurfswissen erzeugt werden könnten. Instrumentenwissen stellt daher einen wesentlichen und positiven Aspekt des Architekturwissens dar. Der Verlust dieses Teilwissens – wie er in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erfolgte – ist zugleich ein Verlust an Architekturwissen.

Heute scheint sich eine neue Synthese aus gestalterischer Kompetenz und Beherrschung der hierfür erforderlichen Instrumente abzuzeichnen, welche die zentrale Bedeutung von Arbeitsverfahren, Geometrie und Maschine für den architektonischen Entwurf anerkennt. Diese Entwicklung sollten wir als neue formale Chance und echte Synthese begreifen – und als neues epistemologisches Paradigma für die Architektur.

56 Whitehead 1958 [1911]: 35f.

Andrew J. Witt ist Architekt. Er arbeitet derzeit im Pariser Büro von Gehry Technologies, wo er mit parametrischen und geometrischen Entwurfsmethoden, neuen Konstruktions- und Bautechniken und der Integration aller beteiligten Fachdisziplinen für verschiedene internationale Auftraggeber befasst ist. Witt ist nicht nur Architekt, sondern auch studierter Mathematiker. Sein spezielles Interesse gilt daher der technischen Synthese und logischen Stringenz der architektonischen Form. Neben der Praxis lehrt er an der Harvard University Graduate School of Design, an der er sein Studium mit einem MArch und einem MDes (in Geschichte und Theorie der Architektur) abgeschlossen hat.

Deutsche Übersetzung:
Annette Wiethüchter.

Andrew J. Witt is a designer currently based in Paris, France. He is a director at the Paris office of Gehry Technologies, where he consults on parametric design, geometric approaches, new technologies, and integrated practice for a diverse range of international clients. Trained as both an architect and mathematician, Witt has a particular interest in a technically synthetic and logically rigorous approach to form. He currently lectures at Harvard University Graduate School of Design, where he completed an MArch and an MDes (History and Theory).

References

- Alberti, Leon Battista.** 1452. *De re aedificatoria*.
ENGLISH: 1988. *On The Art of Building in Ten Books*. Joseph Rykwert with Neil Leach and Robert Tavernor, trans. and ed. Cambridge, Mass: MIT Press.
DEUTSCH: 1991 [1912] *Zehn Bücher über die Baukunst*. Max Theurer, Übers. und Hrsg. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Adams, George.** 1797 [1791]. *Geometrical and graphical essays containing a general description of the mathematical instruments used in geometry, civil and military surveying, levelling, and perspective*. London: J. Dillon and Co.
DEUTSCH: 1795. *Geometrische und graphische Versuche oder Beschreibung der mathematischen Instrumente, deren man sich in der Geometrie, der Civil- und Militair-Vermessung, beim Nivellieren und in der Perspektive bedient*. Johann Gottlieb Geißler, Übers. Leipzig: Siegfried Lebrecht Crusius. Neuaufgabe: 1985. Peter Damerow und Wolfgang Lefèvre, Hrsg. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Aranda, Benjamin/Chris Lasch.** 2006. *Tooling*. New York: Princeton Architectural Press.
- Ashpitel, Arthur.** 1867. *Treatise on Architecture, including the Arts of Construction, Building, Stone-Masonry, Arch, Carpentry, Roof, Joinery, and Strength of Materials*. Edinburgh: Adam and Charles Black.
- Bion, Nicolas.** 1709. *Traité de la construction et des principaux usages des instrumens de mathématique*. Paris. DEUTSCH: 1712. *Neu-eröffnete mathematische werck-schule*. Doppelmayr, Johann Gabriel, Übers. Frankfurt, Leipzig, Nürnberg: im Hoffmännischen Buchladen.
ENGLISH: 1723. *The construction and principal uses of mathematical instruments*. Edmund Stone, trans. London.
- Boyd, Richard.** 1980. "Scientific Realism and Naturalistic Epistemology". *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. Volume Two: Symposia and Invited Papers: 613–662.
- Browne, H. F.** 1942, July. "1598. Amsler's Planimeter." *The Mathematical Gazette*. Vol. 26, No. 270: 135–137.
- Burry, Mark/Jordi Coll Grifoll/Josep Gomez Serrano.** 2008. *Sagrada Família s. XXI*. Barcelona: Edicions UPC.
- Carpo, Mario.** 2003, December. "Drawing with Numbers: Geometry and Numeracy in Early Modern Architectural Design." *Journal of the Society of Architectural Historians*. Vol. 62, No. 4: 448–469.
- . 2008. *Perspective, Projections, and Design*. London: Routledge.
- Colletti, Marjan, ed.** 2010, March/April. "Exuberance: New Virtuosity in Contemporary Architecture." *Architectural Design*. London: Wiley.
- Douliot, Jean Paul.** 1825. *Traité spécial de coupe des pierres*. Paris: Imprimerie de Richomme.
- Evans, Robin.** 2000 [1995]. *The Projective Cast: Architecture and its Three Geometries*. Cambridge, MA: MIT Press.
DEUTSCH [auszugsweise Übersetzung]: 1997, Juni. „Die Anfänge moderner Raumkonzeptionen.“ Fritz Schneider, Übers. 137 ARCH+.
- Hambly, Maya.** 1988. *Drawing Instruments, 1580–1980*. London: Sotheby's Publications.
- Horsburgh, E. M.** 1914. *Modern Instruments and Methods of Calculation*. London: G. Bell and Sons.
- Institution of Civil Engineers.** 1851. *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 10. London: Institution of Civil Engineers.
- Iwamoto, Lisa.** 2009. *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press.
- Kalay, Yehuda/Lucien Swerdloff/Bruce Majkowski.** 1990, Winter. "Process and Knowledge in Design Computation." *Journal of Architectural Education*. Vol. 43, No. 2: 47–53.
- Kieren, Stephen/James Timberlake.** 2004. *Refabricating Architecture*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Kolarevic, Branko.** 2003. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. London: Taylor & Francis.

- Krull, F. N.** 1994, Fall. "The Origin of Computer Graphics within General Motors." *Annals of the History of Computing, IEEE*. Vol. 16, No. 3: 40–56.
- Langlois, Richard N.** 2001. "Knowledge, Consumption, and Endogenous growth." *The Journal of Evolutionary Economics* 11: 77–93.
- Le Corbusier.** 1923. *Vers une architecture*. Paris: G. Cres.
ENGLISH: 1986 [1931]. *Towards a New Architecture*. Frederick Etchells, trans. New York: Dover Publications.
DEUTSCH: 1963 [1926]. *Ausblick auf eine Architektur*. [Bauwelt-Fundamente 2.] Hans Hildebrandt/Eva Gärtner, trans. Gütersloh/Berlin: Bertelsmann Fachverlag Reinhard Mohn.
- Lee, John A. N.** 1995. *International biographical dictionary of computer pioneers*. New York: Taylor & Francis.
- Leroy, Charles-François-Antoine.** 1844. *Traité de stéréotomie, comprenant les applications de la géométrie descriptive...* Paris: Bachelier.
DEUTSCH: 1873. *Die darstellende Geometrie*. E. F. Kauffmann, Übers. Stuttgart: Bach und Kitzinger.
- Lynn, Greg.** 2000. *Folding in Architecture*. London: Wiley-Academy.
- Mallgrave, Harry Francis.** 2010. *The Architect's Brain: Neuroscience, Creativity, and Architecture*. New York: John Wiley and Sons.
- Marguin, Jean.** 1994. *Histoire des instruments et machines à calculer*. Paris: Hermann.
- Mazerolle, Louis.** ca. 1895. *Traité théorique et pratique de charpente*. Paris. Reprint: 2002. Paris: Éditions Vial.
- Monduit, Louis.** 1889. *Traité théorique et pratique de stéréotomie*. Paris: C. Juliot.
- Monge, Gaspard.** 1798. *Géométrie descriptive*. Paris: Baudouin. Reprint of the 1799 Edition: 1989. Paris: Éditions Jacques Gabay.
DEUTSCH: 1900. *Darstellende Geometrie*. [Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Nr. 117.] Robert Haussner, Übers. und Hrsg. Leipzig: W. Engelmann.
ENGLISH: 1851. *An elementary treatise on descriptive geometry*. John Fry Heather, trans. and ed. London: John Weale.
- Morrison-Low, Alison.** 2007. *Making Scientific Instruments in the Industrial Revolution*. Aldershot, UK: Ashgate.
- Murray, Daniel Alexander.** 1898. *An elementary course in the integral calculus*. American Book Company.
- Oxman, Rivka/Robert Oxman, eds.** 2010, Juli. "The New Structuralism." *Architectural Design*. London: Wiley.
- Piedmont-Palladino, Susan.** 2007. *Tools of the Imagination*. New York: Princeton Architectural Press.
- Potie, Philippe.** 1996. *Philibert de l'Orme: Figures de la pensée constructive*. Paris: Éditions Parenthèses.
- Prager, Frank D./Gustina Scaglia.** 1970. *Brunelleschi: Studies of His Technology and Inventions*. London: Dover.
- Protot, C.** 1838. *Cours spécial d'architecture, ou Leçons particulières de géométrie descriptive, comprenant les éléments de géométrie, stéréotomie, etc.* Troyes: L.-C. Cardon.
- Thomson, James.** 1875/76. "On an Integrating Machine Having a New Kinematic Principle." *Proceedings of the Royal Society of London*. Vol. 24: 262–265.
- Turner, Gerard L'Estrange.** 1983. *Nineteenth-century Scientific Instruments*. Berkeley: University of California Press.
- Stanley, William Ford.** 1878. *A Descriptive Treatise on Mathematical Drawing Instruments*. London: Butler and Tanner.
- Suardi, Giambattista.** 1752. *Nuovi istromenti per la descrizione di diverse curve antiche e moderne e di molte altre*. Brescia: G. M. Rizzardi.
- Van Maanen, Jan.** 1992. "Seventeenth-century Drawing Instruments for Drawing Conic Sections." *The Mathematical Gazette*. Vol. 76, No. 476: 222–230.
- Whitaker, Robert J.** 2001, February. "Harmonographs. II. Circular design." *American Journal of Physics* Vol. 69, No. 2: 174–183.
- Whitehead, Alfred North.** 1911. *An Introduction to Mathematics*. New York: Henry Holt.
DEUTSCH: 1958 [1948]. *Eine Einführung in die Mathematik*. B. Schenker, Übers. Bern u.a.: Francke.
- Wood, Christopher.** 2002. "Why Autonomy?" *Perspecta*. "Mining Autonomy." Vol. 33: 48–53.

Picture Credits

Page 7 Courtesy of *Architectural Design*. London: Wiley.

Pages 8 and 9 Courtesy of the Houghton Library, Harvard University, EC75. Ad177.791gc.

Page 10 Courtesy of the Houghton Library, Harvard University, FC7 B5222 Eg723s.

Pages 15–18 From Mazerolle 2002 [1895]. Courtesy Éditions Vial, Paris.

Pages 24 and 25 From Monduit 1889.

Pages 36–41 Drawings and Text: Andrew Witt.

Pages 43 and 45 Courtesy of the Harvard Collection of Historical Scientific Instruments.

