

Das Experiment als Entwurfsmethode Zur Möglichkeit der Integration naturwissenschaftlichen Arbeitens in die Architektur

Toni Kotnik

Einleitung

Physikalische Experimente haben Architekten bei der Formgenerierung immer wieder als Ausgangspunkt für ihre Entwurfsprozesse gedient. Bekannte Beispiele sind Antoni Gaudís Hängemodelle für die Colònia Güell in Barcelona, ► 26 Heinz Islers Membranmodelle für dünnwandige Schalenbauten wie auch Frei Ottos Netzmodelle für zeltartige Dachstrukturen. Insbesondere Otto hat die Bedeutung des Experiments für die Entwicklung seiner Architekturprojekte immer wieder betont.¹ An seinem Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart bildeten physikalische Experimente den Ausgangspunkt systematischer wissenschaftlicher Untersuchungen von Selbstbildungsprozessen der Natur. Seine sogenannten natürlichen Konstruktionen ermöglichten die Extraktion struktureller Prinzipien, welche dann zur Realisierung architektonischer Ideen oder zur Lösung konstruktiver Probleme eingesetzt werden konnten.² Durch das physikalische Experiment, einer methodisch angelegten Untersuchungsanordnung, richtete er eine „Frage an die Natur“, mittels der ein

Ausschnitt der Realität systematisch erfassbar, damit beobachtbar und verständlich werden sollte. Exemplarisch deutlich wird dies an der Reihe von Experimenten zur Formfindung von Membran- und Seilnetzkonstruktionen mithilfe von Seifenlamellen. Ziel dieser – über mehrere Jahrzehnte hinweg durchgeführten – Versuche war die mathematische Darstellung der entstehenden Flächen durch die „geometrische Bestimmung der Form eines Minimalflächen-Seifenfilms zwischen einem Kreisring und einer schlaufenförmigen inneren Unterstützung“³. Hierzu wurden zunächst das Versuchsmedium, die Seifenlösung und der Versuchsaufbau, eine Einrichtung zur kontrollierten Erzeugung von Seifenfilmflächen, sowie deren Abbildung unter gleichbleibender Beleuchtung durch Grundrisprojektionen entwickelt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde dann jede der erzeugten Flächen fotogrammetrisch vermessen und durch den Abgleich der Daten Höhenlinienmaßketten abgeleitet. Diese Maßketten bildeten das Rohmaterial für die abschließende Ausarbeitung der mathematischen Beschreibung der Flächen. ► 27

Experiment as Design Method

Integrating the Methodology of the Natural Sciences in Architecture

Toni Kotnik

Introduction

Physical experiments have served architects as the starting point for their design process, particularly in the generation of form. Well-known examples are Antoni Gaudí's hanging chain model for the Colònia Güell in Barcelona, ► 26 Heinz Isler's membrane model for thin-walled shell buildings, and Frei Otto's net model for tent-like roof structures. Otto, in particular, has repeatedly emphasized the significance of experiments for the development of his architectural projects.¹ At his Institut für leichte Flächentragwerke at the University of Stuttgart, physical experiments were the starting point for systematic scientific investigations into nature's processes of self-formation. His so-called natural constructions enabled the extraction of structural principles, which could then be applied in the implementation of architectural ideas or in solving structural problems.² By using a physical experiment, a methodically established arrangement for an investigation, he arranged a "Question for Nature" by means of which a detail of reality became systematically ascertainable and thus observable and understandable.

This became exemplarily clear in the series of experiments in the form finding of membrane and cable network structures with the help of soap films. The aim of these attempts—carried out across several decades—was the mathematical representation of the surfaces that developed through the "geometrical determination of the form of a minimal-surface soap film between a circular ring and an inner support in the form of a loop."³ For this purpose, first, the medium for the experiment, the soap solution, and the setup for the experiment, a piece of equipment for the controlled generation of soap film surfaces, were developed as well as the imaging of the solution beneath constant illumination through projections of their outline. According to the implementation of the experiment, each of the surfaces generated was then measured photogrammetrically and the contour lines' chain dimension was deduced by calibrating the data. These chain dimensions constituted the raw materials for the conclusive working-out of the mathematical description of surfaces. ► 27

In the interaction between experimental implementation and theoretical analysis, the inductive-

Im Zusammenspiel von experimenteller Durchführung und theoretischer Auswertung spiegelt sich bei Otto die induktiv-analytische Methodik der neuzeitlichen Wissenschaft wider. Dieser methodische Ansatz geht auf die Arbeiten von Nikolaus Kopernikus (1473–1543) und Galileo Galilei (1564–1642) zurück und fand in der



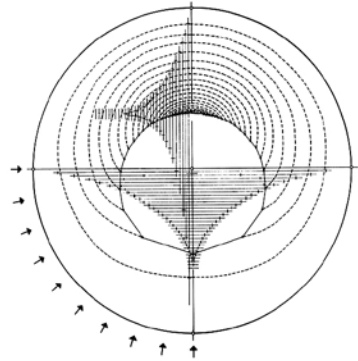
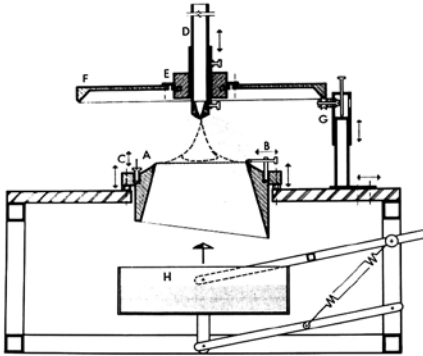
1687 erschien die Schrift *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* von Isaac Newton (1643–1727) seinen endgültigen Ausdruck. Darin gelang Newton die Grundlegung der klassischen Physik nicht nur in inhaltlicher, sondern insbesondere auch in methodischer Hinsicht. Durch die Kombination von induktiver Vorgehensweise und mathematischer Beschreibung der Beobachtungen werden gültige Aussagen aus Experimenten ableitbar. Eine Menge von zusammenhängenden Aussagen kann im Weiteren auf einfache Prinzipien und Mechanismen reduziert und diese leicht verständlichen Grundstrukturen als Ausgangspunkt für eine deduktive Gesamtdarstellung der Eigenschaften und des Verhaltens von Objekten in der Natur verwendet werden. Newton folgte in seiner *Principia Mathematica* dem im 17. Jahrhundert als paradigmatisches Vorbild und Ausdruck von

Wissenschaftlichkeit geltenden *Stoicheia* von Euklid (360–280 v. Chr.); einer axiomatischen Zusammenstellung des geometrischen Wissens der Antike in 13 Büchern.⁴

Ottos methodische Nähe zur experimentellen Arbeitsmethodik der Naturwissenschaften und die sich daraus ergebende Rationalität in der Formentwicklung und Formbeschreibung definiert jedoch keine für die Architektur verallgemeinerbare Entwurfstechnik. Wie von ihm selbst angemerkt, ist die architektonische Relevanz respektive die direkte Anwendbarkeit der wissenschaftlichen Methodik für den Entwurfsprozess limitiert. „Es ist äußerst schwierig, mit Selbstbildungsprozessen zum architektonischen Entwerfen zu kommen. Zwar führt das Experiment auf direktem Weg zur Form, die von sich aus bereits einen Optimierungsschnitt durchlaufen hat, aber eine Entwurfsarbeit kann nur unter Bezug auf die Komplexität einer Bauaufgabe und der Einbindung eines Gebäudes in sein Umfeld und in die Gesellschaft gesehen werden.“⁴⁵

Diese grundsätzliche Einschränkung hängt damit zusammen, dass in einer wissenschaftlich-experimentellen Versuchsanordnung die Anzahl der möglichen Einflussgrößen reduziert werden muss. Erst diese Reduktion erlaubt die autonom ablaufenden Formungsprozesse in den unterschiedlichen Materialsystemen präzise zu untersuchen und deren Verhalten analytisch fassbar zu machen. Das Verhalten des Materialsystems – die physikalischen Rahmenbedingungen des Bauens – stellt nun aber nur eine der Einflussgrößen dar, welche im architektonischen Entwurfsprozess zu einer Synthese gebracht werden müssen. Es überrascht daher nicht, dass diese experimentellen Methoden der Formfindung bei Gaudí, Isler oder

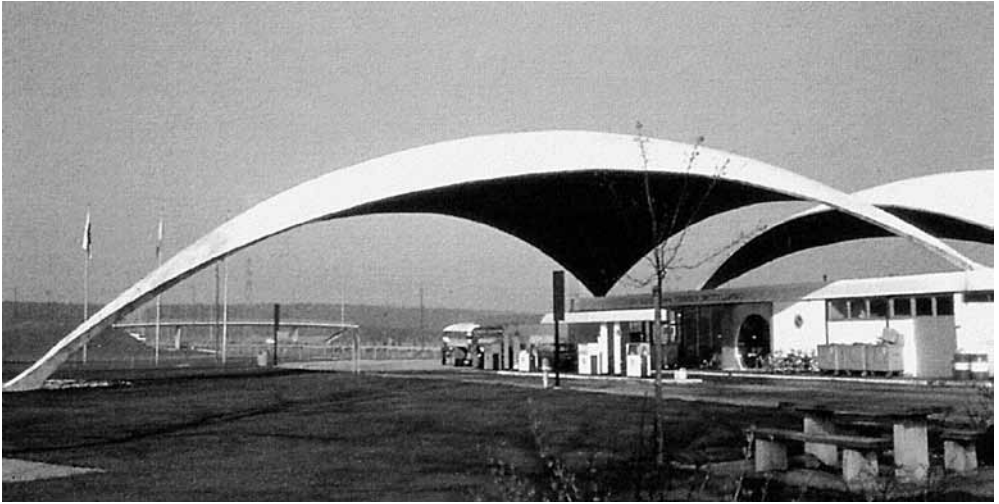
links: Hängemodell für das Gewölbe der Colònia Güell von Antonio Gaudí, 1898 left: Hanging model for the vault of the Colònia Güell by Antonio Gaudí, 1898
 unten: Frei Otto, Versuchsanordnung G11 und Höhenlinienmaßkette below: Frei Otto, G11 test arrangement and contour line measuring chain



deductive methodology of modern science is reflected in Otto's work. This methodical approach has its origin in the works of Nicolaus Copernicus (1473–1543) and Galileo Galilei (1564–1642), and was formalized in the *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* of Isaac Newton (1643–1727), which appeared in 1687. Newton thus succeeded in establishing classical physics not only with regard to content, but particularly with regard to methodology. By means of combining an inductive approach and a mathematical description of observations, significant conclusions can be drawn from experiments. A large number of interrelated conclusions can, subsequently, be reduced to simple principles and mechanisms and these easily understandable frameworks be used as a starting point for a deductive overall view of the properties and the behaviors of objects in nature. In his *Principia Mathematica*

Newton followed Euclides' (360–280) *Stoicheia*, which, in the seventeenth century, was seen as a paradigmatic model for and expression of scientific knowledge; an axiomatic compilation of geometrical knowledge from the ancient world in thirteen books.⁴

Otto's methodical proximity to the experimental working methodology of the natural sciences and the resulting logical reasoning in the development and description of form does not, however, define any kind of design technique that can be generally applied in architecture. As he himself observed, the architectural relevance—respectively, the direct applicability of scientific methodology—is limited for the design process. "It is extremely difficult to carry out architectural design with the self-formation processes. The experiment does indeed lead directly to the form, which in itself has already passed through a optimization



Otto insbesondere im Zusammenhang mit weit gespannten stützenfreien Flächentragwerken ihre Anwendung finden. Bei dieser spezifischen Bauaufgabe wird die Frage des Materialverhaltens und die damit verbundene Möglichkeit des Überspannens von großen Flächen maßgebend, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Tragens also zur dominierenden Einflussgröße, der sich alle anderen für die Architektur relevanten unterordnen müssen, um die prinzipielle Baubarkeit des Bauwerks zu garantieren. Nur durch diese Reduktion architektonischer Einflussgrößen erhält die experimentelle Methodik der Naturwissenschaften unmittelbare entwerferische Relevanz. ► 28

Ottos Ansatz des Experimentierens mit Materialsystemen als Möglichkeit des Verstehens von Selbstbildungsprozessen in der Natur und die daraus entwickelten architektonischen Beispiele – wie das Dach des Olympiastadions in München oder die Multihalle in Mannheim – machen deutlich, dass im physikalischen Experimentieren ein Potenzial für die Architektur vorhanden ist. Zugleich zeigt die obige Diskussion aber klar, dass eine zu große methodische Nähe zu der Vorgehensweise in den Naturwissenschaften das entwerferische Potenzial erheblich einschränkt.

Das Experiment, verstanden als eine präzise und zielgerichtete Handlung, ist dennoch ein mög-

model, but a design work can only be seen with reference to the complexity of a building project and to the way the building integrates into its surroundings and into society.”⁵

This fundamental limit is linked to the fact that in a scientific-experimental arrangement, the number of possible determining parameters must be reduced. Only this reduction enables the autonomously running processes of formation in the various material systems to be investigated thoroughly and their behavior to be made analytically comprehensible. But the behavior of the material systems—the physical basic conditions of the building—really only represents one of the determining factors that have to be brought into synthesis in the architectural design process. It is thus not surprising that these experimental methods of form finding are used by Gaudí, Isler, and Otto in particular in connection with wide-spanning structures. In this specific building task, the question of the behavior of the material and the possibility linked to that of the straddling of large surfaces becomes decisive; the physical capabilities of the bearing thus become one of the dominant determining factors to which all others relevant to the architecture have to subordinate themselves in order to guarantee in principle that the building is able to be built. It is only through this reduction of architecturally determining factors that the experimental methodology of the natural sciences gains direct relevance for the design process. ► 28

Otto’s approach of experimenting with material systems as a possibility for understanding the self formation processes in nature and the architectural examples that are developed from this—such as the roof of the Olympics stadium in Munich or the Multihalle in Mannheim—make clear that there is potential for architecture in

physical experiments. But at the same time, the above discussion does make clear that using a methodology too close to the behavior of the natural sciences considerably limits design potential.

The experiment—understood as a precise, specific activity—is nevertheless a possible mediator between the natural sciences and architecture. This thesis will be demonstrated below in detail. The starting point is an examination of the historical development of the scientific concept of experiment and its position in the working methodology of the natural sciences.

Experiment and Experiential Knowledge

The etymological roots of the German term experiment, like that of the English term experience, both lie in the Latin verb *experiri*—to test, check, try. The experiment, *experimentum*, describes, in its original sense, the carrying out of an activity, the repetition of which leads to an experience, *experientia*. This experience enables “a general assumption to be formulated out of the many thoughts that are created through experience,”⁶ which includes that which is constant, that which stays the same, that which is regular from the repeated carrying out of the experiment and the experience which is created from this. In the understanding of some of the philosophers of the ancient world, such a recognition of regularity was synonymous with the acquisition of knowledge, since this was considered to be the stable thing in that which was constantly changing; the constant being in that which was continually becoming.⁷

The idea of the acquisition of knowledge through experimentation is also demonstrated in Aristotle’s (384–322) epistemological stages. He distinguishes between “sensory perception,”

licher Vermittler zwischen Naturwissenschaft und Architektur. Diese These soll im Folgenden detailliert dargestellt werden. Ausgangspunkt bildet eine Betrachtung der geschichtlichen Entwicklung des wissenschaftlichen Experimentbegriffs und dessen Stellung in der naturwissenschaftlichen Arbeitsmethodik.

Experiment und Erfahrungswissen

Die etymologischen Wurzeln des deutschen Begriffs Experiment wie die des englischen Begriffs *experience* liegen beide im lateinischen Verb *experiri*, testen, prüfen, versuchen. Das Experiment, *experimentum*, beschreibt im ursprünglichen Sinn die Ausführung einer Handlung aus deren mehrfacher Wiederholung sich eine Erfahrung, *experientia*, formt. Diese Erfahrung ermöglicht es, „aus den vielen durch die Erfahrung gegebenen Gedanken eine allgemeine Annahme [zu] formulieren“⁶, welche das Unveränderliche, das Gleichbleibende, das Regelmäßige aus der wiederholten Durchführung des Experiments und der daraus gemachten Erfahrung erfasst. Im Verständnis einiger Philosophen der Antike war ein solches Erkennen von Regelmäßigkeit gleichbedeutend mit dem Erlangen von Wissen, denn dieses wurde als das Stabile im sich ständig Wandelnden, als das unveränderliche Sein im kontinuierlichen Werden betrachtet.⁷

Die Vorstellung des Erwerbs von Wissen durch Experimentieren zeigt sich auch in den epistemologischen Stufen bei Aristoteles (384–322 v. Chr.). Er unterscheidet „sinnliche Wahrnehmung“, „Erinnerung“, „Erfahrung“ und „Wissen“ als zunehmend abstraktere Stufen der Erkenntnis und Ausdruck des Strebens nach Wissen, welches nach Aristoteles eine Eigenschaft der menschlichen Natur selbst darstellt.⁸ Erfah-

rungswissen auf der Basis von Experimenten gilt ihm jedoch nicht als wissenschaftliches Wissen (*episteme*), sondern praktisches (*techne*) oder herstellendes Wissen (*poiesis*). Das Wissen der Wissenschaften sei zweckfrei, das heißt Wissen nur um seiner selbst willen, das Erfahrungswissen hingegen durch seinen Ursprung zweckgebunden und somit nicht freies, reines Wissen. Diese Beschränkung erlaube zwar das Erkennen regelhafter Kausalität, welche aber lediglich „probabel“ sei und somit nicht sicheres, sondern nur wahrscheinliches Wissen darstelle.⁹ „Sicheres Wissen“ der Wissenschaft muss nach Aristoteles daher außerhalb der Erfahrung liegen und kann nicht durch Experimentieren erzielt werden. Das Erlangen solchen Wissens setzt bei ihm infolgedessen andere Mittel und Wege der Erkenntnis voraus, etwa die Anwendung deduktiver Methoden. Dabei werden als „wahr“ akzeptierte grundlegende Aussagen, sogenannte Axiome, durch Regeln des logischen Schließens, wie etwa die von Aristoteles entwickelten Syllogismen, zu neuen Aussagen verknüpft – ähnlich der logischen Verknüpfung von Argumenten in der formalen Beweisführung der Mathematik. Solch theoretisches Wissen ist daher ausschließlich Bestandteil der intelligiblen Welt, nur durch den Geist erfassbar, nicht aber durch die Sinne wahrnehmbar oder durch ein physikalisches Experiment verifizierbar. Erfahrungswissen und wissenschaftliches Wissen unterscheiden sich folglich nicht nur in ihrem Erkenntnisgegenstand, sondern auch im zugehörigen Erkenntnismittel und sind grundsätzlich unvereinbar. Diese epistemologische Unterscheidung von induktiv erzeugtem Erfahrungswissen und deduktiv abgeleitetem wissenschaftlichem Wissen blieb als maßgebendes Erkenntnisideal bis ins Mittelalter wirksam.

“memory,” “experience,” and “knowledge” as increasingly abstract stages of recognition and expression of the striving for knowledge, which, according to Aristotle, represents a characteristic of human nature itself.⁸ Experiential knowledge on the basis of experiments is not, however, considered by him as scientific knowledge (*episteme*), but practical (*techné*) or productive knowledge (*poiesis*). On the one hand, knowledge of the sciences is said to be pure since it is free of specific purpose—that is to say, scientific knowledge is knowledge for knowledge’s sake; on the other hand, experiential knowledge is linked to purpose by way of its origin and is thus neither free nor pure. This limitation does indeed allow for the recognition of regular causality, which is, however, merely “probable” and thus not certain, but only represents probable knowledge.⁹ According to Aristotle, “certain knowledge” of science must lie beyond experience and thus cannot be attained through experimentation. For him, the acquisition of such knowledge, consequently presupposes other means and ways of gaining insight, such as the application of deductive methods. In the process, generally accepted fundamental statements—so-called axioms—become tied in with new conclusions through the rules of logical reasoning (such as the syllogisms developed by Aristotle) similar to the logical connection of arguments in the formal reasoning of mathematics. Such theoretical knowledge is therefore solely a component of the intelligible world, only ascertainable by the intellect but not perceptible through the senses or verifiable by a physical experiment. Experiential knowledge and scientific knowledge are therefore distinguished not only in the object of their knowledge but also in the associated means of recognition and are fundamentally incompatible.

This epistemological distinction between experiential knowledge that is inductively produced, and scientific knowledge that is deductively deduced, remained effective as a decisive ideal of knowledge until the Middle Ages.

Inductive and Deductive Methods of the Natural Sciences

What was radical and pioneering about Galilei was not the way he supported the heliocentric view of the world that went back to Copernicus—which conflicted with the geocentric view of the world at the time, and the theological and scientific doctrine associated with it. It was, rather, his break from Aristotle’s epistemology, apparent in the way he dealt with experiential knowledge as a certain basis for the deduction of theoretical knowledge. “It was not so much his observations and experiments that allowed Galilei to break with tradition, but rather his attitude towards them. He treated the results of his observations and experiments as facts which were independent of an understood view of the world. ... The facts could not be categorically classified within a recognized system of the universe, but it was Galilei’s opinion that it was extremely important to accept the facts in order then to be able to construct an applicable theory from them.”¹⁰ The starting point for Galilei’s attempt to establish theoretical knowledge from experimental observation constituted the generally accepted idea of a mathematically ordered world. Galilei wrote: “Philosophy stands in an open book—I mean the universe that is always open in front of us, but we can only understand it when we understand the language and the letters in which it is written. It is written in the language of mathematics and its letters are triangles, circles and geometric signs, without which

Induktiv-deduktive Methode der Naturwissenschaften

Das radikal Neuartige bei Galilei war nun nicht seine Unterstützung des auf Kopernikus zurückgehenden heliozentrischen Weltbildes, welches im Widerspruch zum geozentrischen Weltbild der Zeit und der damit verknüpften theologischen und wissenschaftlichen Lehrmeinung stand. Vielmehr war es sein Bruch mit der aristotelischen Epistemologie, sichtbar in seiner Behandlung des Erfahrungswissens als sichere Grundlage für die Ableitung theoretischen Wissens. „Es waren weniger seine Beobachtungen und Experimente, die Galilei mit der Tradition brechen ließen, als vielmehr seine Einstellung ihnen gegenüber. Er behandelte die Ergebnisse seiner Beobachtungen und Experimente als Tatsachen, die unabhängig von einem gefassten Weltbild waren [...] Die Tatsachen ließen sich nicht unbedingt in ein anerkanntes System des Universums einordnen, aber Galilei war der Meinung, dass es von entscheidender Wichtigkeit sei, die Tatsachen hinzunehmen, um dann aus ihnen eine geeignete Theorie aufbauen zu können.“¹⁰ Ausgangspunkt für Galileis Versuch der Etablierung von theoretischem Wissen aus der experimentellen Beobachtung bildete dabei die allgemein akzeptierte Vorstellung einer mathematisch geordneten Welt. So schrieb Galilei: „Philosophie steht in dem großen Buch – ich meine das Universum – das stets offen vor uns liegt, aber wir können es erst verstehen, wenn wir die Sprache und die Buchstaben verstehen, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben und seine Buchstaben sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Wort daraus zu verstehen.“¹¹

Anstelle einer bis dahin üblichen qualitativen Erklärung für die Notwendigkeit einer spezifischen Wirkung aus einer gegebenen Ursache setzte Galilei die quantitative Erfassung des Phänomens durch das Messen von Größen, etwa der Distanz zwischen zwei Objekten, und der Beobachtung von Veränderungen dieser Größen.¹² Sein numerischer Ansatz kausaler Naturbeschreibung stand im grundsätzlichen Widerspruch zu Aristoteles und der darauf aufbauenden scholastischen Denktradition. Nach dieser war das Ursächliche nicht nur die logische Erklärung der Wirkung, sondern vor allem eine Offenlegung der ontologischen Sinnhaftigkeit.¹³ Galileis Ansatz der Quantifizierung entsprach einer Neukonzeption von Wissenschaft: Die Erklärung des Warum einer Kausalbeziehung wird ersetzt durch die Erklärung des Wie des Übergangs von Ursache zur Wirkung.¹⁴

Im Geiste entsprach Galileis Methodik der Naturerforschung Francis Bacons (1561–1626) in seinem 1620 veröffentlichten wissenschaftstheoretischen Hauptwerk *Novum Organum Scientiarum*. Darin plädiert er für eine Interpretation der Natur, bei der durch induktives Schließen aus Wahrnehmungen allgemeine Erkenntnisse erzielt werden können. Diese Erkenntnisse spiegelten die innere Natur der Dinge wider und ermöglichten „die Macht und die Herrschaft des Menschengeschlechts [...] über die Gesamtheit der Natur zu erneuern und zu erweitern“¹⁵. Für Bacon war Naturbeherrschung das Ziel der Wissenschaft, „denn der Mensch hat durch seinen Fall den Stand der Unschuld und die Herrschaft über die Geschöpfe verloren. Beides aber kann bereits in diesem Leben einigermaßen wiedergewonnen werden: die Unschuld durch Religion, die Herrschaft durch Künste und Wissenschaften.“¹⁶ Der Mensch könne die Natur aber

it is impossible for a human being to understand a single word of it.”¹¹

Instead of a qualitative explanation for the necessity of a specific effect from a given cause, which had been common until then, Galilei set the quantitative ascertainment of the phenomenon by measuring sizes, for instance the distance between two objects, and the observation of the changes of these sizes.¹² His numerical approach to the causal description of nature conflicted fundamentally with Aristotle and the scholastic tradition of thought that was being built upon this. According to that concept, the causal was not only the logical explanation of the effect but above all a disclosure of ontological meaningfulness.¹³ Galilei’s quantification approach corresponded to a new conception of science: the explanation of the why of a causal relationship is replaced by the explanation of the how of the crossover from the cause to the effect.¹⁴

The spirit of Galilei’s methodology of the exploration of nature corresponded to that of Francis Bacon’s (1561–1626) major work on the theory of science *Novum Organum Scientiarum*, which was published in 1620, and in which he advocates an interpretation of nature through which general knowledge can be obtained by means of inductive reasoning. This knowledge reflects the inner nature of things and allows “the strength and dominance of the human race ... to generate and broaden itself over the whole of nature.”¹⁵ For Bacon, ruling nature was the aim of science, “since, through his fall, man lost his status of innocence and the dominance of nature. But both can be won again even in this life to some extent: The innocence through religion, and the dominance through arts and sciences.”¹⁶ But man can only rule nature when he knows it. For that purpose, reason would have

to interpret nature like a good writer by trying to enter into its “spirit.” According to Galilei, that spirit would be a mathematical one.

For Galilei, the essential characteristic of the mathematical description of natural phenomena is the reduction of the phenomenon to measurable sizes such as lengths, surfaces, volumes, or temporal distances—that is, the quantification already mentioned. It is thus possible to express the relationship between cause and effect as a pair of numbers. By varying the output variables, a large number of different number pairs can be produced in a series of experiments and from their arrangement a pattern can be seen.¹⁷ This pattern can be viewed as experientia, as experience from the repeated implementation of the experiment. The concluding formal description of the pattern as a numerical regularity between the measured sizes is an expression in mathematical form of the causal relationship being examined, and represents the knowledge gained from this inductive process of viewing nature. By using this abstracting approach it was possible to express the assumed causality between cause and effect in an idealized form by means of a mathematical function. The logical combination of mathematical descriptions that had been inductively attained allowed him, furthermore, to draw conclusions and make prognoses about the more complex inter-relationships in nature. Through the deductive interlocking of simple laws of motion he was able to deduce the parabolic flight path of objects for example.¹⁸ On the basis of mathematical description and deductive connection of causal relationships, Galilei was able to set up the experiment as a method of verification that was subordinate to deductive reasoning, so that he concluded: “I have carried out a test for it, but

nur dann beherrschen, wenn er sie kenne. Dazu müsse der Verstand die Natur so auslegen wie ein guter Autor, indem er sich müht, auf ihren „Geist“ einzugehen. Und dieser Geist ist nach Galilei ein mathematischer.

Wesentliches Merkmal der mathematischen Beschreibung von natürlichen Phänomenen bei Galilei ist die Reduktion des Phänomens auf messbare Größen wie Längen, Flächen, Volumen oder zeitliche Abstände – also die bereits genannte Quantifizierung. Hierdurch wird es möglich, die Relation zwischen Ursache und Wirkung als ein Paar von Zahlen auszudrücken. Mittels Variation der Ausgangsgrößen kann in einer Serie von Experimenten eine Menge von unterschiedlichen Zahlenpaaren erzeugt und aus deren Verteilung ein Muster erfasst werden.¹⁷ Dieses Muster kann als *experientia*, als Erfahrung aus der wiederholten Durchführung des Experiments, betrachtet werden. Die abschließende formale Beschreibung des Musters als numerische Regelmäßigkeit zwischen den gemessenen Größen drückt die untersuchte Kausalbeziehung in einer mathematischen Form aus und stellt die gewonnene Erkenntnis aus diesem induktiven Prozess der Naturbetrachtung dar. Durch diese abstrahierende Vorgehensweise wurde es möglich, die unterstellte Kausalität zwischen Ursache und Wirkung in idealisierter Form mithilfe einer mathematischen Funktion auszudrücken. Die logische Verknüpfung von induktiv erzielten mathematischen Beschreibungen ließ ihn zudem Aussagen und Prognosen über komplexere Zusammenhänge in der Natur machen. Durch die deduktive Verschachtelung von einfachen Bewegungsgesetzen konnte er beispielsweise die parabolische Flugbahn von Objekten herleiten.¹⁸ Auf Basis der mathematischen Beschreibung und deduktiven Verknüpfung von

Kausalbeziehungen war es Galilei möglich, das Experiment als eine dem deduktiven Schließen nachgeordnete Methode der Verifikation einzusetzen, sodass er feststellte: „Ich habe ein Experiment darüber angestellt, aber zuvor hatte die natürliche Vernunft mich ganz davon überzeugt, dass die Erscheinung so verlaufen musste, wie sie tatsächlich verlaufen ist.“¹⁹ ► 35

Galileis Methodik der Quantifizierung von Phänomenen der Natur, ausführlich dargestellt in seinem – trotz Publikationsverbots – 1638 erschienen Werk *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze*, war so wirkmächtig, dass bereits ein Jahrhundert später das Zusammenwirken von Experiment und mathematischer Beschreibung und die sich daraus entwickelnde induktiv-deduktive Methode unzweifelhaft als Grundpfeiler der Naturbetrachtung angesehen wurde. So schrieb etwa Immanuel Kant in seiner *Kritik der reinen Vernunft*: „Die Vernunft muss mit ihren Prinzipien, nach denen allein übereinstimmende Erscheinungen für Gesetz gelten können, in einer Hand, und mit dem Experiment, das sie nach jenem ausdachte, in der anderen an die Natur gehen, zwar um von ihr belehrt zu werden, aber nicht in der Qualität eines Schülers, der sich alles vorsagen lässt, was der Lehrer will, sondern eines bestellten Richters, der die Zeugen nötigt, auf die Fragen zu antworten, die er ihnen vorlegt.“²⁰

Mathematik und Architektur

Mit der Hinwendung zur mathematischen Beschreibung von Kausalität setzte im 17. Jahrhundert auch eine Entwicklung in der Mathematik ein, welche zu einer tief greifenden Veränderung in der Art des mathematischen Denkens führte.²¹ Die sich aus dieser Entwicklung herausbildende moderne Mathematik



beforehand natural reason had quite convinced me that the event should run just as it actually did run."¹⁹ ► 35

Galilei's methodology of the quantification of natural phenomena—which, despite a ban on publication, were described in detail in his work from 1638, *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze*—was so influential that already a century later the interaction between experiment and mathematical description and the inductive-deductive method developing out of it was undoubtedly viewed as the

cornerstone of the survey of nature. Immanuel Kant, for instance, wrote in his *Critique of Pure Reason*: "Reason must, with its principles—according to which congruent events can count as the rule—on the one hand, and with the experiment that it devises, and on the other go to nature and indeed in order to be taught by it but not in the way of a schoolchild who always allows everything that the teacher wants to be whispered to him; but of an appointed judge who compels the witnesses to answer the questions that he gives them."²⁰

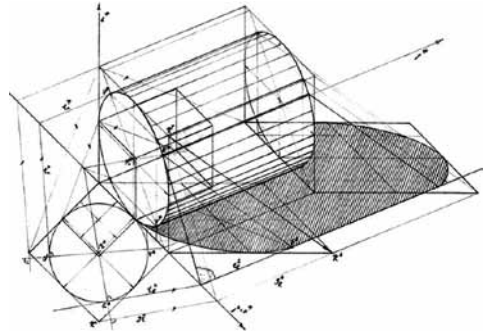
Mathematics and Architecture

By turning towards a mathematical description of causality, a development was established in the seventeenth century that led to a far-reaching change in the way of mathematical thinking.²¹ Emerging from this development, modern mathematics was fundamentally different in terms of the content of its character as well as in its technical nature from Euclides' classical mathematics, which was built on the constructibility of geometry and which had shaped mathematical understanding into the sixteenth century. The reciprocal relativity of progress in natural sciences with that of mathematical methodology led to the fact that in the course of the nineteenth century, the applied use of mathematics within a discipline became a standard measure for the scientific value of the discipline itself. The

unterscheidet sich sowohl in ihrer inhaltlichen wie auch technischen Ausprägung grundsätzlich von der auf der konstruktiven Geometrie Euklids aufbauenden klassischen Mathematik, die bis ins 16. Jahrhundert das mathematische Verständnis geprägt hat. Die gegenseitige Bedingtheit des Fortschritts in den Naturwissenschaften mit jenem der mathematischen Methodik führte dazu, dass im Verlauf des 19. Jahrhunderts die innerhalb einer Disziplin angewandte Art der Mathematik zum Maßstab der Wissenschaftlichkeit wurde. Der englische Ökonom und Philosoph W. Stanley Jevons (1835–1882) betonte etwa, „dass die Volkswirtschaftslehre, wenn sie überhaupt eine Wissenschaft sein will, eine mathematische Wissenschaft sein muss“. Der französische Ökonom Léon Walras führte aus, dass die reine ökonomische Theorie eine exakte Wissenschaft sei, „die den physikalisch-mathematischen Wissenschaften in jeder Hinsicht entspricht. [...] Da die reine Ökonomik bzw. die Theorie des Tauschs und des Tauschwertes, das heißt die Theorie des sozialen Wohlstands betrachtet durch sich selbst, eine physiko-mathematische Wissenschaft ist wie die Mechanik oder die Hydrodynamik, deshalb sollten die Ökonomen nicht davor zurückscheuen, die Methoden und Sprachen der Mathematik zu verwenden.“²² Vergleichbare Tendenzen mathematischer Theoriebildung und Versuche zur Etablierung der Disziplin als „exakte Wissenschaft“ lassen sich im 20. Jahrhundert in der Biologie und Psychologie oder den Sozialwissenschaften aufzeigen.²³

Wird ein solcher auf der Art der Mathematik basierender Maßstab von Wissenschaftlichkeit angelegt, kann die Architektur nicht als wissenschaftliche Disziplin gelten. Das Fehlen einer auf der Mathematik basierenden Theo-

riebildung ist jedoch nicht gleichbedeutend mit einer vollständigen Abwesenheit des Mathematischen. Im Gegenteil: Architektur ist bereits seit Anbeginn durchdrungen von einer ihr eigenen mathematischen Betrachtungsweise, schreibt der Architekturtheoretiker Robin Evans: „Geometrie ist eine Sache, Architektur eine andere.“



Dennoch spielt sie in der Architektur eine ebenso selbstverständliche Rolle wie Mathematik im Bereich der Physik oder sogar Buchstaben in Wörtern. Die Geometrie kann somit als konstitutiver Teil der Disziplin Architektur angesehen werden – unabhömmlich in ihr, allerdings in keiner Weise von ihr abhängig.²⁴ In dieser Aussage spiegelt sich eine Grundüberzeugung wider. Sie durchzieht das Nachdenken über Architektur seit der Antike und kommt in allen bedeutenden Traktaten zur Architektur seit Vitruvs *De architectura* zum Ausdruck. Traditionell wird hierbei die Rolle der Geometrie innerhalb des Entwurfsprozesses als rationale Fundierung des architektonischen Denkens, sowohl auf konstruktiver und perzeptiver als auch auf konzeptioneller Ebene, verstanden.

Diese stabilisierende Wirkung der Mathematik wird nach Evans vor allem durch die Anwendung von „toter Geometrie“, also von geometrischem

English economist and philosopher W. Stanley Jevons (1835–1882) stressed, for instance, “that macroeconomics, if it wants to be a science, has to be a mathematical science.” The French economist Léon Walras remarked that pure economic theory was an exact science “which corresponds to the physical-mathematical sciences in every respect. ... As pure economics—or rather, the theory of exchange and of the value of exchange; that is to say, the theory of social prosperity viewed through itself is a science of physics and mathematics like mechanics or hydrodynamics; economists should therefore shy away from using the methods and languages of mathematics.”²² Comparable trends in mathematical theory formation and attempts to establish the discipline as an “exact science” can also be seen in the twentieth century in biology and psychology.²³

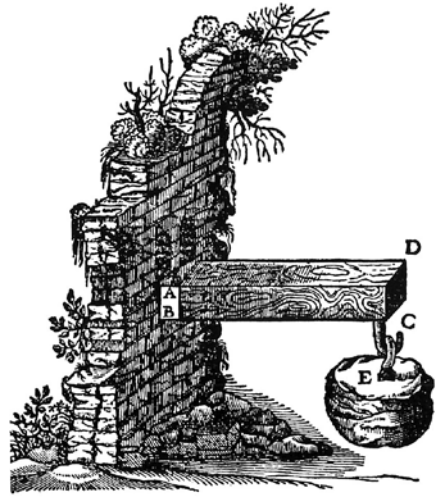
If such a standard of science based on mathematics were to be established, architecture, then, could not be counted as a scientific discipline. The deficiency of a theoretical formation that is based on modern mathematics is, however, not synonymous with a complete absence of the mathematical. On the contrary: architecture is already, from the outset, steeped in one of its own mathematical approaches, as the architecture theorist Robin Evans has explained: “Geometry is one subject, architecture another, but there is geometry in architecture. Its pres-

ence is assumed much as the presence of mathematics is assumed in physics, or letters in words. Geometry is understood to be a constitutive part of architecture, indispensable to it, but not dependent on it in any way.”²⁴ A fundamental principle is expressed in this statement. It has pervaded thoughts on architecture since ancient times and has been articulated in all significant treatises on architecture since Vitruv’s *De architectura*. Traditionally, the role of geometry within the design process is, in this respect, understood as the rational foundation of architectural thinking, on a constructive and perceptual basis as well as on a conceptual one.

The stabilizing effect of mathematics is, according to Evans, above all achieved by the use of “dead geometry”—that is, geometrical knowledge which itself is not developed any further.²⁵ Characteristic of such a situation is the dominance of premodern, classical, plane geometry, and direct developments such as the projections methods of descriptive geometry.²⁶ ► 36 But the use of mathematics within architectural design is not, like with Galilei, motivated by a will to describe physical reality that can be experienced but is, above all, a means of representing a mental picture. The presence of mathematics within architecture that was noted by Evans is thus based on an understanding of geometry that has a double meaning—as a technical means for construction, as well as a repre-

Wissen, welches selbst keine Weiterentwicklung mehr erfährt, erreicht.²⁵ Bezeichnend für eine solche Situation ist die Dominanz der prämodernen klassischen Geometrie der Ebene und jene von Projektionsmethoden der Darstellenden Geometrie.²⁶ ► 36 Doch der Gebrauch von Mathematik innerhalb des architektonischen Entwurfs ist nicht wie bei Galilei durch einen Willen zur Beschreibung der physisch erfahrbaren Wirklichkeit motiviert, sondern vor allem Mittel der Darstellung eines geistigen Bildes. Die von Evans konstatierte Anwesenheit des Mathematischen in der Architektur basiert also auf einem doppeldeutigen Verständnis von Geometrie als technischem Mittel zur Konstruktion sowie Repräsentation von architektonischer Form und zugleich Ausdrucksmittel einer kulturellen Wertvorstellung und Ordnung.²⁷

Aus einer kontinuierlichen Anwendung von klassischer Geometrie in der Architektur kann allerdings nicht unmittelbar auf ein seit der Antike unverändertes Verständnis von Geometrie geschlossen werden. Wie von Alberto Pérez-Gómez in seinem Buch *Architecture and the Crisis of Modern Science* vor allem am Beispiel der französischen Architektur des späten 18. und frühen 19. Jahrhunderts belegt, hat die Mathematisierung der Wissenschaften auch das architektonische Denken stark beeinflusst, indem die transzendente und symbolische Dimension der Geometrie zunehmend durch ein rationales und funktionales Verständnis von Mathematik abgelöst wurde.²⁸ Die „Verwissenschaftlichung“ innerhalb der Architektur zeigt sich daher nicht so sehr in einer Veränderung der in Gebrauch befindlichen mathematischen Techniken und Methoden, sondern vielmehr in einer Verschiebung der kulturellen Wertvorstellung, die mit ihnen verknüpft ist.



Mathematik und Bauingenieurwesen

Neben dieser indirekten Form der Verwissenschaftlichung lässt sich innerhalb des Bauwesens aber auch eine mit anderen Disziplinen vergleichbare, auf Mathematisierung beruhende direkte Form aufzeigen.²⁹ Diese hat ihren Ursprung in Galileis Betrachtung zu Fragen der Statik und Festigkeitslehre, dargelegt in den *Discorsi*. Seine Publikation war Ausgangspunkt für eine intensive Auseinandersetzung und Entwicklung von Experimenten, wie mathematischen Theorien zum Tragverhalten von Bögen und Balken. Bereits gegen Ende des 17. Jahrhunderts bildeten die sich daraus ergebenden Methoden der angewandten Mechanik unverzichtbares Wissen für das Bauen.³⁰ Verantwortlich für ihre Popularisierung war vor allem Philippe de La Hire (1640–1718). In seinem 1695 veröffentlichten *Traité de mécanique* beschrieb er einfache geometrische Konstruktionen zur Dimensionierung von Mauerwerksbögen, eine zeichnerische Methode, deren Weiterentwicklung 1864 in *Die graphische Statik* von Karl Culmann (1821–1861) mündete.³¹

sentation of architectural form and at the same time a means of expressing cultural values and concepts of order.²⁷

An understanding of geometry that has remained unchanged since ancient times cannot, however, be immediately inferred from a continual use of classical geometry in architecture. As documented by Alberto Pérez-Gómez in his book *Architecture and the Crisis of Modern Science*, particularly with respect to the example of French architecture from the late eighteenth and early nineteenth centuries, the reliance on mathematics within the sciences also had a strong influence on architectural thinking in that the transcendental and symbolic dimension of geometry was increasingly being replaced by a rational and functional understanding of mathematics.²⁸ Accordingly, the “scientification” within architecture is not so much to be found in a change of the mathematical techniques and methods, but rather in a displacement of the cultural value system associated with them.

Mathematics and Civil Engineering

Alongside this indirect form of scientification, however, a direct form of scientification exists within architecture, which is based on the presence of modern mathematics comparable to other disciplines.²⁹ This direct form originates in Galilei’s examination of questions regarding statics and the strength of materials, presented

in his *Discorsi*. His publication was the starting point for an intensive examination and development of experiments such as mathematical theories regarding the load-bearing behavior of arches and joists. Towards the end of the seventeenth century, the resulting methods of applied mechanics were already forming essential knowledge for construction.³⁰ One of the foremost individuals responsible for their popularity was Philippe de la Hire (1640–1718). In his *Traité de mécanique*, published in 1695, he described simple geometric structures for the dimensioning of masonry arches; the further development of this design method resulted in *Die graphische Statik* by Karl Culmann (1821–1861) in 1864.³¹

Geometric analyses of statics problems and the associated development of descriptive geometry marked the beginning of a trend towards the scientification of construction and constituted the beginnings of a new branch of the building industry, which was developing from the natural sciences: engineering, which increasingly liberated itself from architecture in the course of the nineteenth century. An expression of this process is the gradual replacement of geometric methods at the start of the twentieth century by analytical methods of numerical mathematics. This paradigmatic change pursued the aim of giving the emerging engineering sciences the aura of science.³²

Geometrische Analysen von statischen Problemen und die damit verbundene Entwicklung der deskriptiven Geometrie markierten den Anfang einer Tendenz zur Verwissenschaftlichung des Bauens und bildeten den Keim einer sich aus den Naturwissenschaften heraus entwickelnden neuen Teildisziplin des Bauwesens: des Ingenieurwesens, das sich im Verlauf des 19. Jahrhunderts zunehmend von der Architektur emanzipierte. Ausdruck dieses Prozesses ist der mit Beginn des 20. Jahrhunderts einsetzende schrittweise Ersatz geometrischer Methoden durch analytische Verfahren der numerischen Mathematik. Dieser paradigmatische Wechsel verfolgte auch das Ziel, den aufstrebenden Ingenieurwissenschaften den Nimbus der Wissenschaftlichkeit zu geben.³²

Als eine aus den Naturwissenschaften heraus entstandene Disziplin ist dem Ingenieurwesen die induktiv-deduktive Arbeitsmethodik und das Zusammenwirken von physikalischem Experiment und mathematischer Beschreibung wohlvertraut.³³ Gegenüber der Architektur führt die sich daraus ergebende Differenz an mathematischer Kompetenz und geometrischem Verständnis zu einer neuen Auffassung der Rolle der Form beim Bauen. Insbesondere die intensive Auseinandersetzung mit neuartigen Materialien wie Stahl und Stahlbeton für die Lösung im Eisenbahn- und Brückenbau beförderte ein andersartiges Formverständnis.³⁴ Es beruht auf

zunehmendem Wissen über das Zusammenspiel von äußerer Form und innerem Kräftefluss durch das Baumaterial.³⁵ ► 41

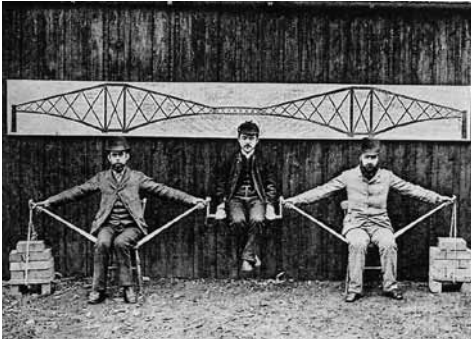
Das Befragen der Natur im Rahmen einer kontrollierten Laborsituation war aber immer auch sichtbares Zeichen eines Willens zur Wissenschaftlichkeit und als solcher Ausdruck der Emanzipation von der Architektur – bewusster, identitätsstiftender Ausdruck des Andersseins.³⁶ Als Folge wurde die für das Architekturschaffen so zentrale Doppeldeutigkeit im Verständnis des Geometrischen aufgelöst. Im Gegensatz zur Architektur ist für die Ingenieurwissenschaften die Frage der Form vor allem an die physikalische Wirklichkeit gebunden, nicht aber an kulturelle Wertvorstellungen.³⁷ Die Frage nach der Bedeutung der Form im Bauen macht somit unterschiedliche Denktraditionen innerhalb des Bauwesens deutlich. Eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Arbeitsweise des Ingenieurwesens seitens des Architekten erlaubt aus diesem Grund nicht nur ein Bewusstwerden der disziplinären Identität durch Abgrenzung, sondern eröffnet vor allem eine Chance zur Erweiterung des entwerferischen Verständnisses – mitunter durch die Adaption experimenteller Methoden.

Algorithmisches Experimentieren

Seit den 1990er Jahren hat die Einführung von digitalen Methoden in den Entwurfsprozess innerhalb des architektonischen Diskurses zu

Having emerged from the natural sciences, the inductive-deductive working methodology and the interaction of physical experiment and mathematical description was very familiar to engineering.³³ Compared with architecture, the difference resulting from mathematical expertise and geometric understanding led to a new

cultural moral values.³⁷ The question as to the meaning of form in construction consequently distinguishes the differing schools of thought within the building industry. For this reason, a more profound examination of the working methods of engineering on the part of architecture allows not only a contemplation of the disciplinary identity through differentiation, but above all, opens up a chance to expand the understanding of design—sometimes by adapting the experimental methodology.



understanding in the role of form in construction. In particular, the intensive examination of new types of materials, such as steel and reinforced concrete, for solutions in the building of railways and bridges promoted a different understanding of form.³⁴ It is based on increasing knowledge about the interplay between external form and the inner flow of forces through the building material.³⁵ ► 41

But observing nature in the context of a controlled laboratory situation was also always a sure sign of a will towards a scientific approach, and as such an expression of the emancipation from architecture—a conscious, identity-creating expression of its otherness.³⁶ As a consequence, the ambiguity so central for the creation of architecture was dissolved in the understanding of the geometric. In contrast to architecture, the question of form for the engineering sciences is primarily linked to physical reality but not to

Algorithmic Experimentation

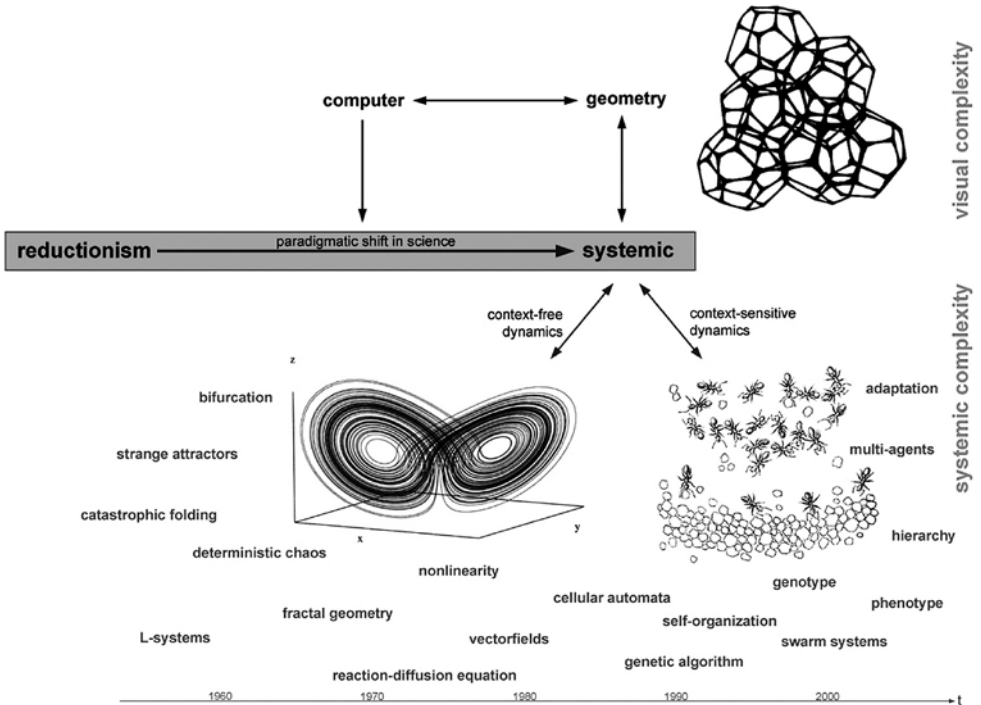
Since the nineteen-nineties the introduction of digital methods in the design process has led to a topologization of form within the architectural discourse; to an understanding of form as a flexible expression of an intrinsic field of geometric interconnections instead of an extrinsic composition of stable basic forms.³⁸ This understanding of form, which first appeared within the sciences of complexity during the nineteen-fifties³⁹, has since led to the reevaluation of scientific working methods and inspired several attempts of architectural adaption.⁴⁰ However, the trend that can be observed in architecture towards physical experiment and its adaptation is not based on a reliance on mathematics in architecture in the sense of the natural sciences, but mainly on an interpretation of the experimentally produced form and the spaces created hereby by means of architectural criteria. The comprehensive, well-documented works of Otto—already mentioned in the introduction—still serve today with such an approach as a source of inspiration and as a starting point.⁴¹ In the context of architectural design, physical experiments do not serve the investigation of causal relationships in nature

einer Topologisierung der Form geführt, also zu einem Verständnis von Form als flexiblen Ausdruck eines intrinsischen Feldes geometrischer Abhängigkeiten anstelle einer extrinsischen Komposition von stabilen Grundformen.³⁸ Dieses Formverständnis hat sich seit den 1950er Jahren zunächst innerhalb der Komplexitätswissenschaften³⁹ gebildet und zur expliziten Auseinandersetzung mit den Methoden des wissenschaftlichen Arbeitens geführt sowie Versuche der architektonischen Adaption angeregt.⁴⁰ Die zu beobachtende Hinwendung der Architektur zum physikalischen Experiment und dessen Adaption basiert allerdings nicht auf einer Mathematisierung der Architektur im Sinne der Naturwissenschaften, sondern vor allem auf einer Interpretation der experimentell erzeugten Formen und der hierdurch gebildeten Räumlichkeiten mittels architektonischer Kriterien. Die bereits in der Einleitung erwähnten umfangreichen und gut dokumentierten Arbeiten von Otto wirken bei einer solchen Vorgehensweise noch heute häufig als Inspirationsquelle und Ausgangspunkt.⁴¹ Das physikalische Experiment dient im Rahmen des architektonischen Entwurfs nicht der Erforschung von kausalen Zusammenhängen in der Natur, sondern vielmehr als Form generierender Teil des Entwurfsprozesses. ► 43

Ein verändertes Formverständnis ist nicht nur Ausdruck vermehrten Interesses an physikalischen Experimenten als Entwurfsmethode, sondern zugleich auch eine Folge der Einbindung digitaler Techniken in die Architektur.⁴² Diese in den 1980er Jahren einsetzende Entwicklung basiert insbesondere auf dem Fortschritt in der Computertechnik und der kostengünstigen Verfügbarkeit von Hardware und Software, was die Möglichkeit der Untersu-

chung des Verhaltens natürlicher Systeme mittels digitaler Simulation ermöglichte.⁴³ Waren bei Ottos Entwurf für das Dach des Olympiastadions aufgrund der limitierten Rechenleistung noch physikalische Experimente für das detaillierte Verständnis des Materialverhaltens notwendig, so können diese natürlichen Prozesse der Formfindung heute auf jedem Laptop digital durchgeführt werden. ► 44 Das Resultat dieser technischen Entwicklung ist einerseits die Bereitstellung von Simulationen, also physikalischen Experimenten in digitalisierter Version, andererseits eine generelle Verfügbarkeit und Handhabbarkeit von rechengestützten Methoden wie etwa Animation, parametrischem Modellieren oder Skripten. Beide Entwicklungen haben das entwurfsmethodische Spektrum der Architektur erweitert und den zeitgenössischen Diskurs durchdrungen.⁴⁴

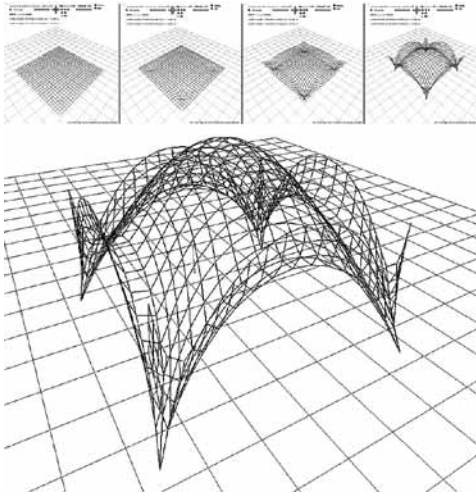
Die Möglichkeit solchen Experimentierens als entwerferische Methode setzt aus diesem Grund in zunehmendem Maße eine bewusste Auseinandersetzung mit dem Computer als Werkzeug voraus. Werkzeuge im Allgemeinen sind nicht neutral, sondern wirken mit der durch das Werkzeug implizierten Art des Gebrauchs auf die Wahrnehmung und das Denken des Benutzers zurück. Dies gilt insbesondere für den Computer, dessen vielfältige Verwendbarkeit auf dem Prinzip der Manipulation von Datenmengen durch eine beschränkte Anzahl von Regeln beruht. Seine Mechanismen wurden bereits 1936 durch Alan Turing mittels eines gedanklichen Konstrukts, der sogenannten Turing-Maschine, beschrieben.⁴⁵ Er konnte zeigen, dass prinzipiell jede durch einen Computer ausführbare Operation mittels einer algorithmisch beschreibbaren mathematischen Funktion darstellbar ist. Ein Computer kann aus diesem Grund als Werkzeug verstanden werden,



but rather act as a form-generating part of the design process. ▶ 43

Such changes in the understanding of form are not only an expression of increased interest in physical experiments as design methods, but can also be regarded as a consequence of the integration of digital techniques in architecture.⁴² This development, which was introduced in the nineteen-eighties, is based in particular on the progress in computer technology and the cost-efficient availability of hardware and

software, which enabled the possibility of investigating the properties of natural systems by using digital simulation.⁴³ If physical experiments still proved necessary for the detailed understanding of the properties of materials in Otto's design for the roof of the Olympic stadium on the grounds of limited computing power, today these natural processes of form-finding can be carried out digitally on any laptop. ▶ 44 The result of this technical development is, on the one hand, the provision of simulations—that



welches das Arbeiten mit denjenigen Kausalbeziehungen zulässt, die quantifizierbar sind.

Das computergestützte Arbeiten mit quantifizierbaren Kausalbeziehungen unterscheidet sich grundsätzlich nicht von Galileis deduktiver Vorgehensweise, also der sukzessiven Verknüpfung von einfachen mathematischen Beziehungen zu komplexeren Aussagen. Die durch den Computer erzeugte neue Qualität des Arbeitens besteht vor allem in der hohen Rechengeschwindigkeit im Vergleich zum händischen Arbeiten bei Galilei und der dadurch möglichen großen Anzahl von Überlagerungen von Beziehungen, welche dann in ihrer Wechselwirkung untersucht werden können. Während das physikalische

Experimentieren ein induktives Ableiten von bisher noch unbekanntem Kausalbeziehungen erlaubt, ermöglicht digitales Arbeiten ein deduktives Untersuchen von Beziehungsgeflechten aus bereits bekannten Kausalbeziehungen. Als Konsequenz daraus hat die Einbindung des Computers als Werkzeug in den Naturwissenschaften zu einem paradigmatischen Umbruch im Naturverständnis geführt. Die seit Galilei dominante reduktionistische Betrachtungsweise wurde zugunsten einer systemischen Vorstellung aufgehoben.⁴⁶ Das Untersuchungsziel hat sich dabei von der Erfassung einer einzelnen Kausalbeziehung zu einem gesamtheitlichen Verständnis eines durch eine Menge von Kausalbeziehungen beschriebenen Netzwerkes von Abhängigkeiten verschoben. Das Experimentelle im Sinne einer „Frage an die Natur“ bezieht sich im digitalen Umfeld auf das Erfassen von komplexen Ordnungsstrukturen in Beziehungssystemen, also auf die Regelmäßigkeiten, welche sich aus Wechselwirkungen von Kausalbeziehungen ergeben. Es sind besonders die sich ausbildenden Muster im systemischen Verhalten, die in der Architektur das Interesse an algorithmisch zu beschreibenden digitalen Experimenten und deren Verwendung als Entwurfsmethode hervorgerufen haben. Ähnlich wie bei physikalischen Experimenten kommt es ebenfalls zu einem Aufbrechen der für die Naturwissenschaften charakteristischen Verflechtung

is, the digital version of physical experiments—and on the other hand, a general availability and manageability of methods such as animation, parametric modeling, or scripts. Both developments have broadened the design spectrum within architecture and penetrated contemporary discourse.⁴⁴

For this reason, the possibility of such experimentation as a design method assumes to an increasing degree a conscious examination of the computer as tool. Tools in general are not neutral but interact with implicit use on the perception and thinking of the user. This is especially the case for the computer and its versatile applicability, which is based on the principle of manipulation of a large amount of data by a limited number of rules. Its mechanisms were already described by Alan Turing in 1936 by means of a theoretical construct—the so-called Turing machine.⁴⁵ He proved that every operation that was able to be carried out by means of a computer was also able to be represented by an algorithmically describable mathematical function. For this reason a computer can be understood as a tool that only permits working with quantifiable causal relationships.

Computer-aided working with quantifiable causal relationships is not fundamentally different from Galilei's deductive approach—that is to say, the successive connection of simple mathematical relationships with more complex conclusions. The new quality of work that is produced by the computer consists chiefly in its high calculation speed in comparison to Galilei's manual work; and the possible, large number of interactions of relationships, the reciprocal actions of which can then be examined. While physical experimentation allows for an inductive deduction of causal relationships hitherto still unknown, dig-

ital working makes possible a deductive examination of interwoven relationships out of causal relationships that are already known about. As a consequence, the integration of the computer as a tool in natural sciences has led to a paradigmatic shift in the understanding of nature. The reductionistic method of observation dominant since Galilei was overridden in favor of a systemic idea.⁴⁶ The aim of research has, in the process, been displaced from the recording of one single causal relationship to a holistic understanding of a network of interconnections which is described by a large number of causal relationships. The experimental in the sense of a "question to nature" refers to the recording of complex structures of order in systems of relationships; that is to say, to the regularities that arise from the reciprocal actions of causal relationships. In particular, it is the patterns that shape themselves in the systemic properties that, in architecture, have aroused interest in digital experiments, which can be algorithmically described, and their application as a design method. Similar to physical experiments, it likewise amounts to a breaking-up of the integration of experimentally produced integration—characteristic for the natural sciences—and the mathematical description of this.

Scientific work with digital experiments requires verification—as already noted by Galilei—a continual balancing of the performance of the system that has been calculated with the performance that can be observed in reality, and a continual adaptation of the mathematical description that is driven by this feedback. In contrast to this, the systems of order that are digitally produced in the architectural design process are not interpreted as conclusions regarding the inner design of nature but much

vom experimentell erzeugten Phänomen und dessen mathematischer Beschreibung. Das wissenschaftliche Arbeiten mit digitalen Experimenten setzt zur Verifikation, wie bereits von Galilei bemerkt, ein kontinuierliches Abgleichen des errechneten Systemverhaltens mit dem in der Realität zu beobachtenden Verhalten und eine durch dieses Feedback gesteuerte kontinuierliche Anpassung der mathematischen Beschreibung voraus. Im Gegensatz dazu werden im architektonischen Entwurfsprozess die digital erzeugten Ordnungsstrukturen nicht notwendig als Aussagen über den inneren Aufbau der Natur interpretiert, sondern vielmehr als Methode der Organisation und Integration einer Vielzahl teilweise widersprüchlicher architektonischer Einflussgrößen, welche durch den Entwurfsprozess in eine kohärente Gesamtheit gebracht werden sollen. Durch die Anwendung digitaler Methoden werden beispielsweise die von Otto in einem physikalischen Experiment erzeugten Muster der Selbstorganisation von Wollfäden in einer wässrigen Lösung frei applizierbar und beim Masterplan für Istanbul von Zaha Hadid Architects als Möglichkeit des Verwebens angrenzender Stadtteile entlang von sich verdichtenden und verzweigenden Zirkulationswegen eingesetzt. Die Ablösung des Experiments von seinem physikalischen Umfeld erlaubt die Kontextualisierung der kausalen Beziehungen innerhalb eines virtuellen Umfelds von den architektonischen, Entwurf bestimmenden Einflussgrößen. Durch das algorithmische Experiment wird die Integration eines mehrdimensionalen Feldes für die Architektur relevanter Parameter ermöglicht und die Überwindung einer – einleitend diskutierten – eindimensionalen Limitierung des Experiments in der Architektur möglich. ► 47

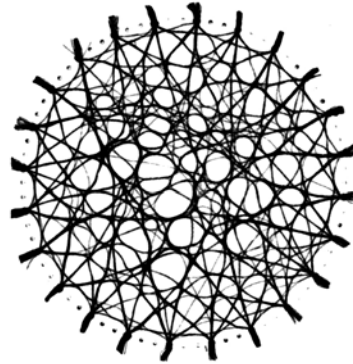
Schlussfolgerung: das Experiment als Bild

Der Erfolg induktiv-deduktiver Vorgehensweisen in der Beschreibung und Vorhersage von Phänomenen der Natur hat das wissenschaftliche Arbeiten in den naturwissenschaftlichen Disziplinen seit dem 17. Jahrhundert geprägt. Dieses Naturverständnis ist aber trotz der mathematischen Methodik nicht so sehr ein numerisches, sondern vielmehr ein bildhaftes, ja sinnbildliches.⁴⁷ Bildhaftes Denken durchzieht das wissenschaftliche Arbeiten: Wissenschaftler denken und kommunizieren in Bildern – in vielen Fällen sind Bilder oder bildhafte Darstellungen der wissenschaftlichen Resultate die eigentliche Inspirationsquelle für weitergehende Forschungsfragen. Bilder sind integraler Teil des Forschungsprozesses und in der Wissenschaftsforschung spielt die Bildwissenschaft daher eine zunehmend wichtigere Rolle.⁴⁸

Die bildorientierte Forschung zum Erkenntnisprozess in den Wissenschaften basiert dabei aber weitestgehend auf einem traditionellen Verständnis des Bildes als planare Repräsentation von Datenmengen. Bereits die Hängemodelle Gaudís machten aber deutlich, dass die experimentelle Tätigkeit selbst als Prozess der räumlichen Bilderzeugung betrachtet werden kann und das resultierende Phänomen der experimentellen Handlung daher als eine bildhafte Darstellung zu verstehen ist.⁴⁹ In der Anwendung naturwissenschaftlicher Methodik innerhalb der Architektur werden sowohl das physikalische wie auch das digitale Experiment aus dem induktiv-deduktiven Zyklus des analytischen Bearbeitens herausgelöst und die entstandenen Formen respektive organisatorischen Muster einer architektonischen Betrachtungsweise zugeführt. Das Resultat des Experiments wird zu einem Bild, das zunächst interpretiert und dann der architektonischen

links: Masterplan für Istanbul von Zaha Hadid, 2008 left: Master plan for Istanbul by Zaha Hadid, 2008

rechts: Experiment zur Wegeorganisation von Frei Otto right: Experiment in the organization of paths by Frei Otto



more as a method of organization and integration of a large number of determining factors that are partially contradictory and should be brought through the design process into a coherent whole. By using digital methods, Otto's model of the self-organization of woolen threads in a watery solution are, for example, freely applicable and used in the master plan for Istanbul by Zaha Hadid Architects as a possibility for the interweaving of adjoining city areas along the densifying and branching of routes of traffic circulation. Displacing the experiment from its physical field allows for the contextualization of the causal relationships within a virtual field by the determining factors that are defined by the architectural design. Through algorithmic experiment the integration of a many-dimensional field of parameters that are relevant to architecture is made possible, and the

overcoming—discussed in the introduction—of a one-dimensional limiting of the experiment becomes possible in architecture. ► 47

Conclusion: The Experiment as an Image

The success of inductive-deductive approaches in the description and prediction of natural phenomena has shaped scientific work in the natural science disciplines since the seventeenth century. But this understanding of nature is—despite mathematical methodology—not so much a numerical but much more a pictorial, even symbolic, understanding.⁴⁷ Pictorial thinking penetrates scientific works: scientists think and communicate in images—in many cases images or pictorial representations of scientific results are the real source of inspiration for continuing research questions. Images are an integral part of the research process and the

Ausformulierung zugeführt werden muss. Als Teil der entwerferischen Handlung wird es somit zu einer formgenerierenden Methode der Visualisierung innerer Zusammenhänge, deren architektonisches Potenzial durch einen anschließenden, weiterführenden Entwurfsprozess allerdings erst herausgearbeitet werden muss. Denn das Resultat eines solchen Experiments selbst stellt in der Regel noch keinen architektonischen Entwurf da, wie bereits in der Einleitung bemerkt, sondern genügt höchstens Teilaspekten der Gestaltung. Die zitierte Feststellung von Otto gilt daher nicht nur für das physikalische, sondern grundsätzlich auch für das digitale Experiment. Beide experimentelle Vorgehensweisen stellen im architektonischen Entwurfsprozess formale Strategien zur Bilderzeugung dar, die das Austesten einer begrenzten Anzahl von für die Architektur relevanten Parametern ermöglichen. Wie die klassische Handzeichnung dient das Experiment somit zur kontinuierlichen Präzisierung einer Entwurfsidee.

Neben der bereits vielfach untersuchten metaphorischen Bezugnahme⁵⁰ zu den Naturwissenschaften ermöglicht das Experiment der Architektur daher auch eine nicht-metaphorische Bezugnahme. Entscheidend bleibt jedoch: Durch die Einbindung von naturwissenschaftlichen Methoden wird die Architektur selbst nicht zu einer ihr Wissen systematisch aufbauenden naturwissenschaftlichen Disziplin. Vielmehr bleiben sowohl die Auswahl wie auch die Durchführung und anschließende Interpretation von Experimenten subjektiv motivierte Handlungen, die keiner allgemein akzeptierten, wissenschaftlichen Konvention folgen können. Die Anwendung physikalischer oder digitaler Experimente stellt daher keine Verwissenschaftlichung des Entwurfsprozesses dar, sondern vielmehr eine

Erweiterung des methodischen Spektrums innerhalb des Architekturschaffens. Die Integration experimenteller Vorgehensweisen in die Architektur eröffnet darüber hinaus eine neuartige Schnittstelle für die Kommunikation zwischen Wissenschaft und Kunst, bei der die Rationalität der naturwissenschaftlichen Betrachtung in Bezug gesetzt wird zu einer sinnlichen und kulturellen Dimension, wie sie durch die Architektur erlebbar wird.

Anmerkungen

- 1 Für eine systematische Zusammenstellung der durchgeführten Experimente siehe Otto, Frei: *Mitteilung des Instituts für leichte Flächentragwerke: Experimente*. IL 25, Stuttgart 1990.
- 2 Otto, Frei: *Natürliche Konstruktionen: Formen und Konstruktionen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*. Stuttgart 1982.
- 3 Otto, Frei: *Mitteilung des Instituts für leichte Flächentragwerke: SFB 64*. IL 6, Stuttgart 1973, S. 57.
- 4 Rossi, Paolo: *Die Geburt der modernen Wissenschaft in Europa*. München 1997, S. 310.
- 5 Otto, Frei: *Mitteilung des Instituts für leichte Flächentragwerke: Experimente*. IL 25, Stuttgart 1990, S. 0.5.
- 6 Aristoteles: *Metaphysik*. Ditzingen 2001.
- 7 So schreibt Platon in seiner Schöpfungsgeschichte *Timaios*: „Es ist nun meiner Meinung nach zuerst das Folgende zu unterscheiden: Was ist das immer Seiende, das kein Werden besitzt, und was das immer werdende, das niemals ist? Das eine ist doch erfassbar durch das an der Vernunft orientierte Denken, da es immer mit sich selbst identisch ist, das andere hingegen ist durch vernunftlose Wahrnehmung bezogene Meinung erfassbar, da es beständig entsteht und vergeht, aber niemals wirklich ist.“ Platon: *Timaios*. Ditzingen 2003, 28a.
- 8 Aristoteles: 2001, A, 980a21.
- 9 In dieser Beschränkung zeichnet sich bei Aristoteles bereits das sogenannte Induktionsproblem ab, welches als eines der Grundprobleme der Erkenntnistheorie gilt und erstmals bei David Hume in seinem Werk *A Treatise of Human Nature* (1739–40) ausführlich diskutiert wird.
- 10 Anthony, Herbert D.: *Science and its Background*. London 1948, S. 145.
- 11 Galilei, Galileo: *Le Opere*. VI Edizione Nazionale, Florenz 1890–1909.
- 12 Kline, Morris: *Mathematics in Western Culture*. Oxford 1966, S. 184–186.
- 13 Wallace, William A.: *Causality and Scientific Explanation*. Michigan 1972.
- 14 Drake, Stillman: *Cause, Experiment and Science*. Chicago 1981, S. 28.
- 15 Bacon, Francis: *Neues Organon*. Bd. 1, Hamburg 1990, S. 271.
- 16 Ebd., Bd. 2, Hamburg 1990, S. 61.
- 17 Mit dem Problem der logisch korrekten Ableitung von

science of images thus plays an increasingly important role in scientific research.⁴⁸ But picture-oriented research in the cognitive process in science has so far been based on a traditional understanding of the image as a planar representation of a volume of data. But Gaudí's hanging chain models already made clear that experimental activity itself can be viewed as a process of the spatial creation of images, and the resulting phenomenon of experimental action can thus be understood as a pictorial representation.⁴⁹ In the application of the methodology of the natural sciences within architecture, as much the physical as the digital experiment are extracted from the inductive-deductive cycle of analytical treatment and the forms that arise from that—organizational models respectively—led to an architectural method of observation. The result of an experiment becomes an image that must be interpreted and then brought to an architectural formulation. As part of the design activity it thus comes to a form-generating method of visualization of inner connections, the architectural potential of which needs to be extrapolated, first of all through a subsequent continuous design process, since the result of such experiment itself does not yet generally represent any architectural design—as has already been noted in the introduction—but mainly conforms to aspects of the design. Otto's aforementioned conclusion would therefore not only apply to physical, but also to fundamental, digital experiments. Both experimental approaches represent process formal strategies for the creation of images in architectural design, which allow for testing a limited number of parameters relevant to architecture; just like classical hand drawing is useful for the continual refinement of a design idea.

In addition to the metaphorical reference⁵⁰ to the natural sciences that has already been researched many times, the experiment in architecture allows for a non-metaphorical reference. What remains a deciding factor, however, is this: by integrating the methods of the natural sciences, architecture itself does not become a scientific discipline that systematically builds upon its knowledge. On the contrary, both the selection and the implementation and subsequent interpretation of activities that are subjectively motivated by experiments are unable to follow any generally accepted scientific convention. Thus, the use of physical or digital experiments does not represent a scientification of the design process, but rather a broadening of the spectrum of methods within the creation of architecture. Above all, the integration of experimental approaches in architecture opens up a new interface between science and art in which the logical reasoning of scientific observation is set in relation to a sensual and cultural dimension that can be experienced through architecture.

Notes

1 For a systematic compilation of the experiments that have been carried out, see Otto, Frei. *Bulletin of the Institut für leichte Flächentragwerke: Experimente*, No. 25, Stuttgart 1990.

2 Otto, Frei. *Natürliche Konstruktionen: Formen und Konstruktionen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*, Stuttgart 1982.

3 Otto, Frei. *Bulletin of the Institut für leichte Flächentragwerke: SFB 64*, No. 6, Stuttgart 1973, p. 57.

4 Rossi, Paolo. *Die Geburt der modernen Wissenschaft in Europa*, Munich 1997, p. 310.

5 Otto, Frei. *Bulletin of the Institut für leichte Flächentragwerke: Experimente*, No. 25, Stuttgart 1990, S. 0.5.

6 Aristoteles: Ditzingen 2001.

7 See also: Platon. *Timaios*, Ditzingen 2003, 28a.

8 Aristoteles. *Metaphysik*, Ditzingen 2001, A 980a21.

9 In this limitation, we can already see in Aristotle's work the so-called induction problem, which is regarded as one of the main problems of epistemology and which is discussed in detail for the first time in David Hume's work *A Treatise of Human Nature* (1739–40).

10 Anthony, Herbert D. *Science and Its Background*, London 1948, p. 145.

Regeln aus einer Menge von Zahlenpaaren hat sich in systematischer Art und Weise insbesondere John Stuart Mill in seinem 1843 erschienen Werk *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive* auseinandergesetzt. Er entwickelt darin die Grundlagen einer wissenschaftlichen Methode, die mittels vier einfacher Regeln und unter Voraussetzung weniger universeller Prinzipien kausale Strukturen und Gesetzmäßigkeiten aus Zahlenpaaren ableitet.

18 Kline, Morris: *Mathematics in Western Culture*. Oxford 1966, S. 194–195.

19 Galilei: 1890–1909.

20 Kant, Immanuel: *Kritik der reinen Vernunft*. Frankfurt/Main 1974.

21 Als eine der wichtigsten Methoden zur Darstellung der aus Experimenten gewonnenen Datenmenge gilt die Darstellung der Zahlenpaare in Koordinaten. Die formale Einführung der Koordinatenmethode durch René Descartes und Pierre de Fermat um 1637 ermöglichte die Verzahnung von bis dahin getrennt wirkenden geometrischen und algebraischen Methoden und stellt aus heutiger Sicht die Voraussetzung und Kern einer leistungsfähigen Mathematik dar. Zudem ermöglichte die Einführung der Koordinaten die Entwicklung der Infinitesimalrechnung, eine für die Naturwissenschaften grundlegende Beschreibungsmethodik die von Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz um 1665 ausgearbeitet wurde. Das 17. Jahrhundert kann somit als Beginn der neuzeitlichen Mathematik betrachtet werden. Für eine detaillierte Darstellung der Mathematikgeschichte siehe Scriba, Christoph J./Schreiber, Peter: *5000 Jahre Geometrie*. Berlin 2000.

22 Kirchgässner, Gebhard: *Homo oeconomicus*. Tübingen 2008, S. 272.

23 Murray, James D.: *Mathematical Biology I: An Introduction*. Berlin 2002; Atkinson, Richard C.: *Studies in Mathematical Psychology*. Stanford 1964; Fararo, Thomas J.: *Mathematical Sociology: An introduction*. New York 1973.

24 Evans, Robin: *The Projective Cast: Architecture and Its Three Geometries*. Massachusetts 1995, xxvi.

25 „From the point of view of the architect seeking firmness and stability, the best geometry is surely a dead geometry, and perhaps that, by and large, is what architecture is made with.“ Evans: 1995, xxvii.

26 Mit Ausnahme weniger Avantgarde-Schulen wie etwa das SciArc in Los Angeles, der Columbia University in New York oder der Architectural Association in London ist ein Blick in den Lehrplan von Architekturschulen ausreichend, um diese Aussage zu belegen.

27 In Le Corbusiers *Modulor* zeigt sich exemplarisch eine solche – auch in der Moderne noch wirksame – Doppelrolle der Mathematik innerhalb der Architektur. Le Corbusier: *Der Modulor: Darstellung eines in Architektur und Technik allgemein anwendbaren harmonischen Maßes im menschlichen Maßstab*. München 1956.

28 Pérez-Gómez, Alberto: *Architecture and the Crisis of Modern Science*. Massachusetts 1983.

29 Addis, Bill: *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. London 2007.

30 Kurrer, Karl-Eugen: *The History of the Theory of Structures*. Berlin 2008, S. 201.

31 Maurer, Bertram: *Karl Culmann und die graphische Statik*. Berlin 2006.

32 Ingenieurwissenschaften wurden an Polytechnika und Technischen Hochschulen unterrichtet. Diese standen im Wettbewerb mit den etablierten Universitäten und strebten

die Gleichstellung mit ihnen an. Für eine ausführliche Betrachtung siehe etwa: Mauer: 2006.

33 Im Verlauf der geschichtlichen Entwicklung der Ingenieurwissenschaften war das Verhältnis von experimenteller Praxis und mathematischer Theorie nicht immer ausgewogen, aber beide Komponenten waren im Diskurs immer vorhanden. Für eine detaillierte Darstellung siehe etwa Straub, Hans: *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*. Basel 1992.

34 Addis: 2007.

35 Billington, David P.: *The Art of Structural Design: A Swiss Legacy*. Yale 2003.

36 Westermann, Andrea: *Mathematik zwischen Leitdisziplin und Hilfswissenschaft*. Zürich 2008.

37 Addis: 2007.

38 Di Cristina, Giuseppe: *Architecture and Science*. New York 2001; Kolarevic, Branko (Hrsg.): *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. London 2003.

39 Hedrich, Rainer: *Die Entdeckung der Komplexität: Skizzen einer strukturwissenschaftlichen Revolution*. Frankfurt/Main 1994; Mussmann, Frank: *Komplexe Natur – Komplexe Wissenschaft: Selbstorganisation, Chaos, Komplexität und der Durchbruch des Systemdenkens in den Naturwissenschaften*. Opladen 1995.

40 So schreiben Antoine Picon und Alessandra Ponte: „Recently artists and architects have been drawn toward science, as opposed to technology proper, for their inspiration. For this type of connection between architecture and science, the computer, of course, is central.“ Picon, Alessandra/Ponte, Alessandra (Hrsg.): *Architecture and the Sciences: Exchanging Metaphors*. Princeton 2003, S. 14. Und Mario Carpo führt aus: „So we see how an original quest for formal continuity in architecture, born in part as a reaction against the deconstructionist cult of fracture, ran into the computer revolution of the mid-nineties and turned into a theory of mathematical continuity. [...] Without this preexisting pursuit of continuity in architectural forms and processes, of which the causes must be found in cultural and societal desires, computers in the nineties would most likely not have inspired any new geometry of forms.“ In: Lynn, Greg (Hrsg.): *Folding in Architecture*. New York 2004 (Überarbeitete Auflage), S. 16.

41 So bemerkt der Architekt Lars Spuybroek: „In the books of Frei Otto there are two categories of research. One applies to specific projects, the other is more fundamental research into form finding: forces working on balloons, lacquer, wool threads and so on. The second one is the main source of interest to us, and here he basically developed two techniques: line-to-surface and surface-to-line generation. [...] Both methods create porous systems where the holes are not positioned accidentally nor subtracted afterwards. Holes co-evolve with the geometry. In this project we used the analogue techniques to study surfaces that can both contain expansive open spaces for communication and contractive closed spaces for concentration.“ Spuybroek, Lars: *NOX: Machining Architecture*. London 2004, S. 216.

42 Kolarevic: 2003; Spuybroek, Lars (Hrsg.): *The Architecture of Variation*. London 2009; Weinstock, Michael/Balmond, Cecil: „The Digital and the Material“. In: *AD Architectural Design*. 1/72, New York 2002, S. 46–51.

43 Weinstock, Michael/Stathopoulos, Nikolaos: „Advanced Simulation in Design“. In: *AD Architectural Design*. 2/76, New York 2005, S. 54–59.

- 11 Galilei, Galileo. *Le Opere. VI Edizione Nazionale*, Florence 1890–1909.
- 12 Kline, Morris. *Mathematics in Western Culture*, Oxford 1966, p.184–186.
- 13 Wallace, William A., *Causality and Scientific Explanation*, Michigan 1972.
- 14 Drake, Stillman. *Cause, Experiment and Science*, Chicago 1981, p. 28.
- 15 Bacon, Francis. *Neues Organon* [English title: *New Organon*], Vol. 1, Hamburg 1990, p. 271.
- 16 *Ibid.*, p. 61.
- 17 The problem of the logically correct deduction of rules from a number of number pairs was systematically examined by John Stuart Mill in particular in his work from 1843, *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive*. In this, he developed the basis of a scientific method, which by means of four simple rules and on the condition of a few universal principles, can deduce causal structures and regularities from number pairs.
- 18 Kline, Morris. *Mathematics in Western Culture*, Oxford 1966, pp. 194–195.
- 19 Galilei, Galileo: 1890–1909.
- 20 Kant, Immanuel. *Kritik der reinen Vernunft*, Frankfurt/Main, 1974.
- 21 The representation of number pairs in coordinates counts as one of the most important methods in the representation of volumes of data derived from experiments. The formal introduction of the co-ordinates method by René Descartes and Pierre de Fermat around 1637 made possible the interlocking of effective geometric and algebraic methods that had been separate until then, and represents from a current point of view the precondition and core of a capable system of mathematics. In addition, the introduction of the coordinates enabled the development of the infinitesimal calculus, a methodology of description fundamental for the natural sciences that was developed by Isaac Newton and Gottfried Wilhelm Leibniz around 1665. The seventeenth century can thus be seen as the beginning of modern mathematics. For a more detailed representation of the history of mathematics, see Scriba, C./Schreiber, P. *5000 Jahre Geometrie*, Berlin 2000.
- 22 Kirchgässner, Gebhard. *Homo oeconomicus*, Tübingen 2008, p. 272.
- 23 Murray, James D. *Mathematical Biology I: An introduction*. 3rd edition, Berlin 2002; Atkinson, Richard C. *Studies in Mathematical Psychology*, Stanford 1964; Fararo, Thomas J. *Mathematical Sociology: An Introduction*, New York, 1973.
- 24 Evans, Robin. *The Projective Cast: Architecture and Its Three Geometries*, Massachusetts 1995, p. xxvi.
- 25 "From the point of view of the architect seeking firmness and stability, the best geometry is surely a dead geometry, and perhaps that, by and large, is what architecture is made with." Evans: 1995, p. xxvii.
- 26 With the exception of a few avant-garde schools such as the Sci-Arc in Los Angeles, Columbia University in New York, and the Architectural Association in London, a look at the curriculum of architecture schools is sufficient to prove this assertion.
- 27 Le Corbusier's *Modulor* gives a good example of the dual role mathematics has within architecture and which is still effective in modern times. Le Corbusier. *Der Modulor: Darstellung eines in Architektur und Technik allgemein anwendbaren harmonischen Masses im menschlichen Massstab*, Munich 1956.
- 28 Pérez-Gómez, Alberto. *Architecture and the Crisis of Modern Science*, Massachusetts 1983.
- 29 Addis, Bill. *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*, London 2007.
- 30 Kurrer, Karl-Eugen. *The History of the Theory of Structures*, Berlin 2008, p. 201.
- 31 Maurer, Bertram. *Karl Culmann und die graphische Statik*, Berlin 2004.
- 32 Engineering sciences are taught at polytechnics and technical high schools. These compete with the established universities and strive for an equal ranking with them. For a detailed view, see, for example, Mauer, Bertram: 1998.
- 33 In the course of the historical development of the engineering sciences the relationship between experimental practice and mathematical theory was not always balanced, but both components were always present in discussion. For a detailed representation, see, for example, Straub, H. *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*, Basel 1992.
- 34 Addis, Bill: 2007.
- 35 Billington, David P. *The Art of Structural Design: A Swiss Legacy*, Yale 2003.
- 36 Westermann, Andrea. *Mathematik zwischen Leitdisziplin und Hilfswissenschaft*, Zurich 2008.
- 37 Addis, Bill: 2007.
- 38 Di Cristina, Giuseppe. *Architecture and Science*, New York 2001; Kolarevic, Branco (ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, London 2003.
- 39 Hedrich, Rainer. *Die Entdeckung der Komplexität: Skizzen einer strukturwissenschaftlichen Revolution*, Frankfurt/Main 1994; Mussmann, F. *Komplexe Natur—Komplexe Wissenschaft: Selbstorganisation, Chaos, Komplexität und der Durchbruch des Systemdenkens in den Naturwissenschaften*, Opladen 1995.
- 40 Antoine Picon and Alessandra Ponte write: "Recently artists and architects have been drawn toward science, as opposed to technology proper, for their inspiration. For this type of connection between architecture and science, the computer, of course, is central." Picon, A./Ponte, A. (eds.). *Architecture and the Sciences: Exchanging Metaphors*, Princeton 2003, p. 14. And Mario Carpo remarks: "So we see how an original quest for formal continuity in architecture, born in part as a reaction against the deconstructivist cult of fracture, ran into the computer revolution of the mid-nineties and turned into a theory of mathematical continuity. ... Without this preexisting pursuit of continuity in architectural forms and processes, of which the causes must be found in cultural and societal desires, computers in the nineties would most likely not have inspired any new geometry of forms." In Lynn, G. (ed). *Folding in Architecture*, New York 2004 (revised edition), p. 16.
- 41 The architect Lars Spuybroek remarks: "In the books of Frei Otto there are two categories of research. One applies to specific projects, the other is more fundamental research into form finding: forces working on balloons, lacquer, wool threads, and so on. The second one is the main source of interest to us, and here he basically developed two techniques: line-to-surface and surface-to-line generation. ... Both methods create porous systems where the holes are not positioned accidentally nor subtracted afterwards. Holes co-evolve with the geometry. In this project we used the analogue techniques to study surfaces that can both contain expansive open spaces for communication and contractive closed spaces for concentration." Spuybroek, L. *NOX: Machining Architecture*, London 2004, p. 216.
- 42 Kolarevic, Branco: 2003; Spuybroek, Lars (ed.). *The Ar-*

- 44** „Computationally advanced design techniques such as scripting and parametric modelling are becoming a pervasive reality such that it is no longer possible to compete within the contemporary avant-garde architecture scene without mastering and refining them.“ Schumacher, Patrick: „Parametricism – A New Global Style for Architecture and Urban Design“. In: *AD Architectural Design*. 4/79, New York 2009, S. 17.
- 45** Turing, Alan: „On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem“. In: *Proceedings of the London Mathematical Society*. 2. Ausgabe, 42, London 1936, S. 230–265.
- 46** Hedrich: 1994.
- 47** Ernst, Richard E.: „In Bildern denken. Mit Bildern kommunizieren“. In: *ETH Bulletin*. 298, Zürich 2005, S. 10.
- 48** Meier-Rust, Kathrin: „Die Wissenschaft und ihre Bilder“. In: *NZZ am Sonntag*. Zürich, 23. Dezember 2007.
- 49** Alsina, Claudi/Gómez-Serrano, Josep: „Gaudian Geometry“. In: Giralt-Miracle, Daniel (Hrsg.): *Gaudi. Exploring Form*. Barcelona 2002, S. 27–45.
- 50** Picon/Ponte: 2003.

- chitecture of Variation*, London 2009; Weinstock, Michael/Balmond, Cecil. "The Digital and the Material." In: *AD Architectural Design*, 72/1, New York 2002, pp. 46–51.
- 43** Weinstock, Michael/Stathopoulos, Nikolaos. "Advanced Simulation in Design." In: *AD Architectural Design*, 2/76, New York 2005, pp. 54–59.
- 44** "Computationally advanced design techniques such as scripting and parametric modelling are becoming a pervasive reality such that it is no longer possible to compete within the contemporary avant-garde architecture scene without mastering and refining them." Schumacher, P. "Parametricism—A New Global Style for Architecture and Urban Design." In: *AD Architectural Design*, 79/4, New York 2009, p. 17.
- 45** Turing, Alan. "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem." In: *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2nd Series, 42, London 1936, pp. 230–265.
- 46** Hedrich, Richard: 1994.
- 47** Ernst, Richard E. "In Bildern denken. Mit Bildern kommunizieren." *ETH Bulletin*, 298, Zurich 2005, p. 10.
- 48** Meier-Rust, Kathrin "Die Wissenschaft und ihre Bilder." In: *NZZ am Sonntag*, Zurich 2007, December 23.
- 49** Alsina, Claudi/Gómez-Serrano, Josep. "Gaudian Geometry." In: Giralt-Miracle, Daniel (ed.). *Gaudi. Exploring Form*, Barcelona 2002, pp. 27–45.
- 50** Picon, Antoine/Ponte, Alessandra: 2003.