

Messung

Oliver Schlaudt

Die Messung ist eine Kulturtechnik zur quantitativen Bestimmung von Sachverhalten und als solche grundlegend für die mathematische Repräsentation und die Anwendung mathematischer Schlusstechniken. Die Geschichte der fortschreitenden Bildung von quantitativen Begriffen in der Ausweitung der mathematischer Wissenschaften erweist sich als ein komplizierter Prozess, der in Auseinandersetzung mit vorhandenem Wissen, technologischen Fähigkeiten und symbolischen Ressourcen stattfindet und dabei zu Koordinierungen zwischen symbolischen Repräsentationen und instrumentellen Mitteln führt. Während der Erfolg der mathematischen Naturwissenschaft zu platonischen Spekulationen über eine mathematische Verfassung der Wirklichkeit Anlass gab, verweist der Aspekt der instrumentellen Vermittlung im Messprozess auf einen neuzeitlichen Naturbegriff, der diese in Hinsicht auf ihre technische Verfügbarkeit erfasst, womit sich die Messung in das neuzeitliche Projekt einer technischen Naturbeherrschung einschreibt.

Zitations- und Lizenzhinweis

Schlaudt, Oliver (2020): *Messung*. In: Kirchhoff, Thomas (Hg.): *Online Encyclopedia Philosophy of Nature / Online Lexikon Naturphilosophie*. ISSN 2629-8821. doi: 10.11588/oepn.2020.0.76526

Dieses Werk ist unter der Creative Commons-Lizenz 4.0 (CC BY-ND 4.0) veröffentlicht.

Vorbemerkung

Das philosophische ‘Messproblem’ in einem allgemeinen Sinne beschäftigt sich mit der Messung als Bedingung der mathematischen Repräsentation von Sachverhalten. In der Diskussion um die Quantenmechanik und ihre Deutung ist ein gleichnamiges ‘Messproblem’ aufgetaucht, welches darin besteht, dass auf quantenmechanischer Ebene die Wechselwirkung zwischen System und Messinstrument eine ganz neue Interpretation erfährt (Neumann 1932). Quantenmechanisch betrachtet stellt die Wechselwirkung mit dem Messinstrument nicht bloß eine mögliche Störung des Systems in seinem Größenzustand dar (wie z.B. auch schon ein Thermometer die Temperatur einer Flüssigkeitsmenge beeinflussen kann), sondern bringt das System überhaupt erst in einen definiten Zustand (der sogenannte „Kollaps der Wellenfunktion“). Ob man einem (quantenmechanischen) System unabhängig von der Messung einen definiten Zustand zuschreiben kann und wie es überhaupt möglich ist, Zustände in der Sprache der Zahlen zu beschreiben, sind aber zwei verschiedene Fragen, die unabhängig voneinander behandelt werden können. Das vorliegende Lemma handelt von der letzteren der beiden Fragen.

1. Das Messen und seine Bedeutung

Bei der Messung handelt es sich um eine dem Zählen nah verwandte Kulturtechnik, die sich in der westlichen Traditionslinie auf die ersten Hochkulturen in Mesopotamien und Ägypten zurückverfolgen lässt. Anfangs von Relevanz insbesondere im Kontext von wirtschaftlichen und technischen Handlungen, kommt ihr später in den modernen Naturwissenschaften eine besondere Rolle zu. Entsprechend ihrer enormen kulturellen Bedeutung ist die Messung Gegenstand einer umfangreichen, aber auch sehr heterogenen Literatur. Man findet nebeneinander (1.) die Gattung praktischer Leitfäden der Messung, welche allerdings in eine theoretisch-wissenschaftliche Literatur fließend übergeht, beispielsweise von der Kunst der Feldmessung zur Geometrie, von der Wägekunst zur Statik; (2.) eine moderne metrologische Literatur, die sich sowohl mit praktischen als auch theoretischen Fragen der Messung und insbesondere der Konstruktion von Einheiten und Einheitensystemen beschäftigt; (3.) die Literatur der formale Skalentheorie, die sich theoretisch mit der Konstruktion und Klassifikation von Skalentypen beschäftigt; (4.) eine messtheoretische Literatur im Sinne der philosophischen Wissenschaftstheorie; und (5.) schließlich eine historisch-

soziologische Literatur über die Messung, ihre Geschichte und ihren gesellschaftlichen Kontext.

Nach einer berühmten Definition durch den amerikanischen Psychologen Stanley S. Stevens, welche der formalen Messtheorie den Weg ebnet und somit für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts und die sich in dieser Zeit institutionalisierende Wissenschaftstheorie bestimmend werden sollte, kann Messung „in the broadest sense“ als „the assignment of numerals to objects or events according to rules“ verstanden werden (Stevens 1946: 677). Durch Messung kann eine begrifflich fixierte Eigenschaft in ihrer quantitativen Ausprägung bestimmt und numerisch ausgedrückt werden. Während in praktischen Zusammenhängen der numerische Ausdruck selbst aufgrund seines spezifischen Informationsgehalts angestrebt wird, kommt in wissenschaftlich-theoretischen Zusammenhängen der Aspekt hinzu, dass der numerische Ausdruck die Anwendung der Mathematik als besonderer Schlußtechnik gestattet, insbesondere die Formulierung mathematischer Naturgesetze und die Berechnung von Prognosen aus aktuellen Messwerten und Naturgesetzen.

Beim logisch basaleren Zählen werden begrifflich fixierte, individuell identifizierbare Gegenstände von konkreter oder abstrakter Natur („Äpfel“, „Neutrinos“, in zweiter Ordnung die Zahlen selbst usw.) sukzessive und mit der „Eins“ beginnend konventionellen, standardisierten Zahlzeichen oder -wörtern isomorph (d.h. umkehrbar eindeutig) zugeordnet (Janovskaja [1936] 2011). Diese Zuordnung erlaubt die Anwendung der Gleichheits- und Ordnungsrelationen „gleich viele“, „mehr“ oder „weniger“ auf Paare von Gegenstandsmengen. Beim Messen hat man es mit nur einer einzigen begrifflich fixierten Eigenschaftsklasse zu tun, die aus einer graduierbaren Eigenschaft gebildet wird, das heißt einer Eigenschaft, die in ihrer Größe unterschiedlich stark ausgeprägt sein und in dieser Ausprägung auf numerische Weise bestimmt werden kann. Diese numerische Bestimmung geschieht ‘unterhalb’ der Ebene qualitativer Prädikatoren. Anders also als beispielsweise bei dem Farbspektrum, in welchem einige Ausschnitte (in unterschiedlicher Körnung) konventionell (bzw. bedingt durch die Sinnesphysiologie des menschlichen Auges) herausgegriffen und durch die entsprechenden Farbprädikatoren „blau“, „grün“, „gelb“, „rot“ usw. benannt werden, treten beim Messen die Zahlwörter an die Stelle solcher Prädikatoren, also zum

Beispiel „430 Nanometer Wellenlänge“. Größenbegriffe erlauben, einen Unterschied zu benennen, wo wir durch die Verwendung qualitativer Prädikatoren keinen Unterschied mehr erfassen, wenn sich zum Beispiel innerhalb von „Ultramarinblau“ Licht der Wellenlängen „430 Nanometer“ und „435 Nanometer“ unterscheiden lässt. Bertrand Russell sprach deshalb von Größenbegriffen als „a conception of difference without a difference of conception“ (Russell 1897: 340) – sprich: ein Größenunterschied ist ein Unterschied zwischen zwei Dingen, die in ihrer qualitativ-begrifflichen Beschreibung keinen Unterschied aufweisen müssen. Christian Wolff definierte die Größe (*quantitas*) im selben Sinne als das „discrimen internum similitudinis“, also den inneren Unterschied des Ähnlichen, bzw. als dasjenige, „quo similia salva similitudine intrinse differre possunt“, also dasjenige, worin ähnliche Dinge sich unterscheiden können, ohne ihre Ähnlichkeit zu verlieren (Wolff [1763] 1962: 273). Mit Verwendung der rationalen und reellen Zahlen ist die numerische Bestimmung theoretisch mit beliebiger Genauigkeit möglich, wenngleich das praktische Messen immer einer Ungenauigkeit unterworfen bleibt, die als „Messfehler“ oder der „Messungenauigkeit“ (*measurement uncertainty*) selbst quantitativ ausgedrückt wird.

Um eine graduierbare Eigenschaft durch Messung numerisch bestimmen zu können, ist es notwendig, eine Einheit (provisorisch oder verbindlich) festzulegen. Die Rolle der Einheit spielen historisch oft Naturgegenstände oder Gegenstände von praktischem Belang (Fuß und Elle in der Längenmessung, Scheffel als Volumenmaß etc.). Auch kann die Wahl der Einheit von dem Kontext abhängen, was auch in der Wissenschaft noch der Fall ist (z.B. der Gebrauch von Lichtjahr statt Meter als astronomisches Längenmaß oder der atomaren Masseneinheit *u* statt Kilogramm in Chemie und Atomphysik). Die heutigen Grundeinheiten sind an Naturkonstanten gekoppelt und damit in hochgradig theorieabhängiger Weise definiert (Courtenay et al. 2019). Ist die Einheit bestimmt, reduziert sich das Messen auf ein Zählen: Es wird nun gezählt, wie oft die Einheit in die zu bestimmende Größe „passt“ (in einem unten spezifizierten Sinne).

Wenn das Zählen auch logisch grundlegender als das Messen ist, so sind die historischen Verhältnisse komplizierter. Rudimentäre Zähltechniken verbaler und nonverbaler, aber vorschrittlicher Natur dürfte es zwar

schon vor den ersten Hochkulturen und vor der neolithischen Revolution gegeben haben (siehe z.B. Overmann 2014; d'Errico et al. 2017). Schriftliche Zahlzeichen, die tatsächlich die ältesten Schriftzeichen überhaupt zu sein scheinen, bilden sich aber erst in einem historischen Kontext heraus, in welchem auch bereits gemessen wird, was sich im Vorkommen von Zeichen für Maßeinheiten dokumentiert (Nissen et al. 1993). Historisch wäre es also vermutlich irreführend, die Messung als Anwendung bereits vorhandener Zahlzeichen auf eine neue, abgeleitete Technik zu betrachten. Schrift, Systeme von Zahlzeichen und Maßeinheiten scheinen vielmehr gleichzeitig zu entstehen und sich in ihrer Entwicklung gegenseitig zu beeinflussen.

2. Von der Messung zur Messtheorie

Das Nachdenken über das Messen, insbesondere über die Bedingungen der Möglichkeit des Messens und über Grenzen des Messens, entzündet sich sehr viel später an der Ausdehnung der Messung auf neue Gebiete im Zuge der Entstehung und Entwicklung der modernen Wissenschaften. Einem Vorschlag von Gernot Böhme (1976a) folgend, kann man begrifflich zwischen der „Quantifizierung“ als der Herausbildung phänomenspezifischer Größenbegriffe und der (logisch folgenden) „Metrisierung“ als der Abbildung des quantitativ erschlossenen Phänomenbereichs auf die Zahlen durch die Konstruktion einer Metrik unterscheiden. Die messtheoretische Begleitreflexion scheint sich vor allem an Schwierigkeiten der Quantifizierung in der Erschließung neuer Phänomenbereiche entzündet zu haben. Beispielhaft können Gottfried Wilhelm Leibniz' Überlegungen über das „Maß der bewegenden Kraft“ von 1696 genannt werden, Thomas Reids Kritik quantitativer Moralphilosophie von 1748 sowie die umfangreiche Kontroverse über die „Psychophysik“, die im 19. Jahrhundert durch Theodor Gustav Fechners Versuch der Messung der Stärke von Empfindungen ausgelöst wurde (siehe die Materialien in Schlaudt 2009a sowie zur Psychophysik Heidelberger 1993). Sehr schnell kristallisiert sich in dieser Literatur ein Konsens heraus, dass notwendige Bedingung des Messens ist, empirische Gegenstücke zu den arithmetischen Operationen (vor allem der Addition) und Beziehungen (vor allem der Gleichheit) zu finden, womit die oben verwendete Rede-weise vom „Passen“ der Einheit in die zu messende

Größe mit einer konkreten Handlungsanweisung verbunden wird (Helmholtz 1887). Die an der psychologischen Forschung orientierte formale Messtheorie, wie sie im 20. Jahrhundert dominierte, war vor allem an der Konstruktion verschiedener Skalentypen interessiert (Krantz et al. 1971–1990). Die Rolle der Messinstrumente, die zum Beispiel bei Ernst Mach (1896) oder dem jungen Rudolf Carnap (1926) noch präsent war, ist erst in den vergangenen Jahren im Rahmen des „practical turn“ wieder in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt (Chang 2004; Tal 2013). Allein die sogenannte Protophysik hatte konsequent eine systematische Rekonstruktion der Messtechnik an den Anfang der Wissenschaftstheorie gestellt (Lorenzen 1987; Janich 1997). Parallel zur formalen Messtheorie hat sich unter dem Namen der Metrologie auch eine eigene, mit den praktischen und theoretischen Problemen befasste Disziplin herausgebildet. Ein Teil ihrer Bemühung gilt der Entwicklung eines begrifflichen Rahmenwerks der Metrologie im *Vocabulaire international de métrologie* (JCGM 2012), welches allerdings stark an der Physik orientiert ist. Leitend für die wissenschaftstheoretische Untersuchung der Messung sind zwei Fragen: Zum einen die Frage nach der Rechtfertigung von Messprozeduren: Lässt sich argumentativ die Verlässlichkeit von Messprozeduren begründen, und inwiefern wird der Messprozess dadurch abhängig von theoretischen Erkenntnissen („theoriegeladen“)? Besonderes Interesse zieht dabei die Technik der indirekten Messung auf sich, durch welche eine Größe vermittelt einer anderen gemessen wird, wie zum Beispiel bei der Temperaturmessung durch die Länge eines Quecksilberfadens oder eines thermoelektrischen Potentials (Mach 1896; Chang 2004). Die zweite Frage gilt dem klassischen Problem des Verhältnisses von Repräsentation und Wirklichkeit mit den typischen Polen von realistischen und konstruktivistischen Positionen (vgl. Ellis 1968; Falckenburg 1997; van Fraassen 2008).

Aus der Perspektive einer historischen Epistemologie lässt sich die Quantifizierung beschreiben als Versuch, zwei Techniken miteinander in Einklang zu bringen, nämlich das Operieren mit Messinstrumenten und Messeinheiten einerseits und die symbolische Technik der Operation mit Zahlen und algebraischen Größen andererseits. Beide Seiten, also nicht nur die der Messtechnik, sondern auch die der Mathematik entwickeln sich dabei historisch. Die Zahlen bilden sich erst

allmählich heraus (Damerow 1994) und werden allmählich erweitert (Neal 2002), und auch die algebraischen Größenkalküle entwickeln sich von der antiken und noch frühneuzeitlichen Proportionenschreibweise hin zur modernen Algebra erst von skalaren Größen, dann aber auch komplexeren Gebilden wie Vektoren (gerichteten Größen) und Tensoren (van der Waerden 1985).

Die Entstehung der Größenbegriffe stellt sich in dieser Perspektive als ein komplizierter Prozess dar. Während die Naturwissenschaften zu Beginn auf eine entwickelte alltagsweltlich-handwerkliche Messtechnik zurückgreifen konnten, mussten andere nach Mathematisierung strebende Wissenschaften wie die Chemie oder die Psychologie ganz neue quantitative Begriffe schöpfen. Aber auch die Physik musste zur Bewältigung der Phänomene bald neue Größenbegriffe einführen. Ein erstes Beispiel findet man schon in der antiken Theorie des Hebels bei Aristoteles („Mechanica“) und Archimedes („On the equilibrium of planes“). Am Hebel lässt sich die Erfahrung machen, dass sich Gewicht und Länge gegenseitig kompensieren können, ein Weniger an Gewicht also durch ein Mehr an Länge wettgemacht werden kann (Renn/McLaughlin 2018; McLaughlin/Schlaudt 2020). Da Gewicht und Länge disparate und somit nicht direkt vergleichbare Dimensionen darstellen, ist es alles andere als trivial, wie man diese Erfahrung in einer neuen Begriffsbildung einer kombinierten „Wirkung“ von Gewicht und Länge abbilden kann, wengleich diese Schwierigkeit im Rückblick durch die Einfachheit der mathematische Lösung dieser Aufgabe durch das Produkt von Länge und Gewicht (im Hebelgesetz) verdeckt wird. Ein jüngeres Beispiel bietet der Begriff der (kinetischen) Energie. Hier war es nicht so, dass die Physiker erst ein Maß für eine präzise identifizierte Größe – die „Energie“ – einführten und diese sodann quantitativ studieren und beispielsweise entdecken konnten, dass es sich um eine besondere Größe handelt, für welche ein Erhaltungssatz gilt. Es war in diesem Sinne keine Entdeckung der Physik, dass die Energie in mechanischen Systemen erhalten bleibt. Vielmehr waren sich die Physiker des 17. Jahrhunderts einig, dass in solchen Systemen irgendetwas, was sie provisorisch die „Kraft bewegter Körper“ nannten, erhalten sein muss.¹

In der sogenannten *vis-viva*-Kontroverse stritten sie sodann darüber, wie diese Kraft zu „schätzen“ sei, das heißt wie ihr Maß so definiert werden könne, dass sich die Erhaltung in der numerischen Konstanz des Maßes ausdrückt (McLaughlin 1996). Dieser Prozess war auch deshalb so kompliziert, weil, wie man im Rückblick weiß, im vage erfassten Phänomenbereich zwei Erhaltungsgrößen involviert waren, die erst voneinander geschieden werden mussten – Energie und Impuls, erstere eine skalare Größe, letztere aber ein vektorielle Größe, für welche zudem die adäquaten mathematischen Darstellungsmittel fehlten. Einen ähnlichen Fall kennt man aus der Entwicklung des Thermometers, in welcher erst die Begriffe der Temperatur und der Wärmemenge voneinander geschieden werden mussten (Böhme 1976b; 1999). An all diesen Fällen sieht man, dass die Bildung quantitativer Begriffe zwar in einer einfachen definitiven Setzung mündet, aber historisch einen komplizierten Prozess darstellt, der in Auseinandersetzung mit dem Vorwissen, dem Vorbegriff des Phänomens und den technischen und mathematischen Möglichkeiten stattfindet und dessen Erfolgsbedingungen nicht a priori gegeben sind (Schlaudt 2009b).

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch, dass Beschreibung von Messtechnik und physikalische Theoriebildung fließend ineinander übergehen. Antike, Mittelalter und Neuzeit kannten alle eine dem praktischen Messen gewidmete Literatur, wie beispielsweise das *Feldmesserbuch* des Hyginus Gromaticus (Hyginus 2018) aus dem 1. nachchristlichen Jahrhundert oder Albrecht Dürers *Vnderweysung der Messung* von 1525 oder Johannes Keplers *Auszug aus der uralten Messerkunst Archimedis* von 1616 und noch George Adams *Geometrische und graphische Versuche* von 1795. In diesen Zusammenhang gehört auch die mittelalterliche „Wägekunst“ oder *scientia de ponderibus* (Moody/Clagett 1952), in welcher Duhem die Anfänge der Statik lokalisiert (Duhem 1905/1906). Simon Stevins Werk von 1586 ist zwar noch *Grundlagen der Wägekunst (De Beghinselen der Weeghconst)* überschrieben, handelt aber nicht mehr von der Messtechnik, sondern von theoretischer Statik. Dieser Zusammenhang bleibt bis in die moderne Physik erhalten. Einsteins grundlegende

¹ Dass die Energie erhalten sein muss, lässt sich nach Freudenthal 1999 als eine Konsequenz des physika-

lischen Systembegriffs verstehen, der die Energieerhaltung einfach als Identitätskriterium enthält.

Arbeit zur speziellen Relativitätstheorie *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (1905) beginnt mit einer Revision der Grundbegriffe von Zeit und Raum und ihrer Messung. Metrologische Grundlegung und physikalische Theoriebildung bleiben mithin in einem komplizierten Wechselverhältnis begriffen.

An anderen Wissenschaften, die auf keine alltagsweltliche Messtechnik zurückgreifen können, sondern ihre quantitativen Grundbegriffe von Grund auf konstruieren müssen, sieht man, dass die Schwierigkeiten schon auf einer sehr basalen Ebene auftreten können, teilweise schon beim einfachen Zählen. In der Konstruktion von Maßen lokaler Biodiversität beispielsweise (Magurran 2004: 72, 137 f., 142 f.) muss vorab geklärt werden, was überhaupt unter einer Spezies verstanden werden soll, und selbst dann verbleiben noch Probleme, zum Beispiel weil nicht alle Spezies ständig am Ort ansässig sind. In Pflanzenkollektiven, die durch vegetative Vermehrung entstanden sind und somit aus Klonen bestehen (sogenannten Geneten oder *clonal colonies*), ist schon die Identifizierung eines Individuums der Spezies problematisch. Ebenso ist nicht immer klar, inwiefern in Ökosystemen, in welchen sich die Elemente als Resultat einer evolutionär entstandenen Stabilisierung gegenseitig stützen, überhaupt eigenständige Entitäten identifiziert werden können, wie es heute etwa in Ansätzen des 'green accounting' geschieht (Vatn 2000). In der Entwicklung von wirtschaftlichen Kapazitätsmaßen wie dem Bruttoinlandsprodukt muss geklärt werden, welche die kleinste produktive Einheit ist. Die Ökonometrik entschied sich für den Haushalt statt für das Individuum (Gilbert et al. 1949), womit nur die über den Markt ausgetauschten Güter und Dienstleistungen, nicht aber die haushaltsinterne Produktion gezählt wird (Waring 1988). Solche diese Beispiele zeigen, dass noch vor den eigentlichen messtheoretischen Fragen, die vor allem die Vergleichbarkeit betreffen, schon die für das bloße Zählen notwendige eindeutige Identifizierung von Einheiten problematisch sein kann.

3. Naturphilosophische Implikationen

Befragt man die Messung auf ihre naturphilosophische Bedeutung, so lassen sich provisorisch zwei Perspektiven unterscheiden, von welchen die eine vom *Resultat* der Messung, also der mathematischen Repräsentation ausgeht, und die andere von der Messung als einem *Prozess*.

Ausgehend von der mathematischen Repräsentation als Resultat der Messung – und befeuert von dem beachtlichen Erfolg einer mathematischen Naturbeschreibung in der Physik – haben manche Autoren in der ersten Perspektive die Vorstellung einer mathematischen Verfassung der Natur selbst erwogen. Der Physiker Eugene P. Wigner folgerte aus dem Erfolg der mathematischen Beschreibung, dass die Mathematik „in a very real sense, the correct language“ sei (Wigner 1960: 8). Während „Richtigkeit“ („correctness“) vermutlich so viel wie Strukturgleichheit von Mathematik und Natur bedeutet, ging Werner Heisenberg einen Schritt weiter und identifizierte die Bausteine der Materie mit mathematischen Entitäten. Die Tatsache, dass sich die Eigenschaften der Elementarteilchen als Invarianten von gruppentheoretisch beschriebenen Symmetrietransformationen einer Feldtheorie gewinnen lassen, legte ihm nahe, die Elementarteilchen mit diesen Symmetrien zu identifizieren: „Denn die kleinsten Einheiten der Materie sind tatsächlich nicht physikalische Objekte im gewöhnlichen Sinne des Wortes; sie sind Formen, Strukturen, oder im Sinne Platons, Ideen, über die man unzweideutig nur in der Sprache der Mathematik reden kann“ (Heisenberg [1967] 1973: 237). Eine solche Form von Platonismus und mathematischem Realismus lässt sich bis in die Renaissance zurückverfolgen, zum Beispiel zu Galileis berühmtem Vergleich des Universums mit einem Buch, das in der „Sprache der Mathematik“ verfasst sei, mit „Dreiecken, Kreisen und anderen geometrischen Formen als Buchstaben“ (Galilei [1623] 1977: 25²; zum historischen Kontext siehe Gorham et al. 2016; Falkenburg 2017).

² Galilei [1623] 1977: 25: „La Filosofia è scritta in questo grandissimo libro, che continuamente ci stà aperto innanzi à gli occhi (io dico l'vniuerso) ma non si può intendere se prima non s'ipara a'itender la lingua, e conosceri i caratteri, ne'quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, & altre figure Geometriche, senza i quali mezzi è

impossibile à intenderne vmanamente parola; senza questi è vn'aggirarsi vanamente per vn'ocuro laberinto.“ Englische Übersetzung in Galileo 1957: 237 f.: „Philosophy is written in this grand book, the universe, which stands continually open to our gaze. But the book cannot be understood unless one first learns to comprehend the language and read the letters in which it

In der zweiten Perspektive, die von der Messung als einem Prozess ausgeht, rückt hingegen die Vermittlung der Naturerfahrung durch das Instrument in den Vordergrund. In dieser Perspektive sind insbesondere drei Aspekte relevant: das Verhältnis von Natur und Technik, die Größe als dispositionale Eigenschaft und die Maßeinheit als Naturgegenstand.

Den ersten Aspekt teilt die Messung mit dem Experiment. Messungen geschehen mit Messapparaten und sind dementsprechend wie das Experiment technisch vermittelt. Wie für das Experiment im Allgemeinen gilt dann für die Messung im Besonderen, dass sie erst dann als naturwissenschaftliches Erkenntnismittel infrage kommt, wenn der (im Allgemeinen implizit unterstellte) Naturbegriff die Technik als Teil der Natur unterstellt. In den *Mechanischen Problemen* des Aristoteles (Aristoteles: *Mechanica*; Winter 2007) beispielsweise findet sich eine starke Opposition von Natur (*φύσις*, *physis*) und Technik (*τέχνη*, *techne*) (vgl. Dunshirn 2019). Die Natur umfasst Vorgänge, die 'von selbst' geschehen („things that happen according to nature“) und dementsprechend rein beobachtend erfasst werden. Die Technik hingegen gilt als widernatürlich oder gar als Überlistung der Natur („things happening contrary to nature, done through art for the advantage of humanity“). In der Technik vollbringt der Mensch, was von alleine nicht geschehen wäre, und er erzeugt unter Umständen auch Wirkungen, die seine Kräfte eigentlich übersteigen. In der frühen Neuzeit ändert sich der Naturbegriff. Bei Francis Bacon hören die Bestimmungen als natürlich und künstlich auf, einen Gegensatz zu bilden. In den Beschreibungen der Technologien von *New Atlantis* (Bacon 1626) bezeichnen „natural/naturalis“ und „artificial/artificialis“ bloß noch den natürlichen oder menschlichen Ursprung zum Beispiel eines Metalls oder eines Minerals, aber keinen ontologischen Unterschied mehr. René Descartes identifiziert Kunst und Natur in den *Prinzipien der Philosophie* von 1644

ausdrücklich miteinander: abgesehen von der Größe der Teile erkenne er keinen Unterschied zwischen den von Handwerkern hergestellten Maschinen und den von der Natur hervorgebrachten Körpern; alle Regeln der Mechanik (d.h. der Lehre von den Maschinen) gehörten auch der Physik (der Lehre von der Natur) an, so dass, wie es in der zeitgenössischen französischen Übersetzung noch deutlicher heißt, „alle Dinge, die künstlich sind, damit auch natürlich sind“.³ Diese Subsumtion der Technik unter die Natur ist notwendig dafür, das Experiment so zu verstehen, dass sich an der Technik die Natur zeigt. Insofern Experiment und Messung die privilegierten Zugänge der Wissenschaften zur Natur werden, kann die Subsumtion von Technik unter Natur in diejenige von Natur unter die Technik umschlagen. Natur wird dann „*sub specie machinae*“ interpretiert (Freudenthal 1999: 17), das heißt als Maschine, meist als Uhr, gedeutet, zum Beispiel in der Vorstellung einer *machina mundi* oder Weltmaschine (McLaughlin 1994).

Der zweite naturphilosophisch relevante (und dem ersten direkt verwandte) Aspekt ist der der Größe als dispositionale Eigenschaft. Die Messung involviert eine kausale Wechselwirkung zwischen dem Messgegenstand (*measurand*) und dem Messinstrument. Das Instrument spielt dabei eine zweifache Rolle. Erstens fungiert es als Filter, welcher die möglichen kausalen Wechselwirkungen auf eine Dimension reduziert, nämlich die in der Messung interessierende. Auf der Waage wirkt ein Körper nur durch sein Gewicht, in der Wechselwirkung mit einem Elektrometer nur durch seine elektrische Ladung usw. Zweitens verfügt das Instrument über einen Mechanismus, der es erlaubt, die Wechselwirkung numerisch zu bestimmen. Messung als kausale Interaktion heißt aber, dass die in der Messung bestimmte Größe den Charakter einer Potenz oder eben Disposition hat (zu fundamentalen physischen Eigenschaften als Dispositionen siehe Goodman 1983: 40 f., 45).

is composed. It is written in the language of mathematics, and its characters are triangles, circles, and other geometric figures without which it is humanly impossible to understand a single workd of it; without these, one wanders about in a dark labyrinth.“

³ Descartes 1644: §§203, 307: „Atque ad hoc arte facta non parum me adjuverunt: nullum enim aliud, inter ipsa & corpora naturalia discrimen agnosco, nisi quod

arte factorum operationis, ut plurimum peraguntur instrumentis adeò magnis, ut sensu facilè percipi possint. [...] Et sanè nullæ sunt in Mechanicâ rationes, quæ non etiam ad Physicam, cujus pars vel species est, pertneant“. Vgl. Descartes 1647: 480: „Et il est certain que toutes les regles des Mechaniques appartiennent à la Physique, en sorte que toutes les choses qui sont artificielles sont avec cela naturelles.“

Die numerische Größenangabe ist mithin als Voraussage der Wirkung eines Gegenstandes auf ein entsprechendes, standardisiertes Messinstrument zu verstehen. Der Messwert informiert mithin über die Natur als technisch Verfügbare.

Eine besondere Stellung nehmen in dieser Hinsicht die Größen der Länge und der Dauer ein, da sie nicht bloß als Bestimmungen von Gegenständen und Ereignissen gemessen, sondern unabhängig von diesen materiellen Bezugspunkten zu den Dimensionen von Raum und Zeit (bzw. einem vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum, vgl. Minkowski 1909) hypostasiert werden. Newton beschrieb Raum und Zeit, wie sie der Physik zugrundeliegen, als durch eine innere Homogenität charakterisierte Entitäten. Es ist klar, dass es sich dabei um eine Projektion von technischen Normen der Messung auf die Natur handelt. Eine *Uhr* muss gleichmäßig laufen und *Maßstäbe* deformationsfrei transportiert und lückenlos aneinandergelegt werden. Daraus werden eine Zeit, die selbst gleichmäßig fließt, und ein Raum, der stetig und homogen ist (vgl. Janich 1980). Dagegen kann James J. Gibson vom Standpunkt der empirischen Wahrnehmungspsychologie zu recht geltend machen: „Isaac Newton asserted that ‘absolute, true, mathematical time, of itself and from its own nature, flows equably without relation to anything external.’ But this is a convenient myth. [...] Time and space are not empty receptacles to be filled; instead, they are simply the ghosts of events and surfaces“ (Gibson 1979: 100 f.).

Ein dritter naturphilosophisch relevanter Aspekt kann in der Rolle der Maßeinheit ausgemacht werden. Einen Hinweis auf die besondere Rolle der Einheiten gibt die Spannung, die zwischen der Definition der Messung als Bestimmung *einer* Größe (in der eingangszitierten Definition von Stevens oder auch im *Vocabulaire International de Métrologie*, wo Messung definiert wird als „process of experimentally obtaining one or more quantity values that can reasonably be attributed to a quantity“ – JCGM 2012: 16, Hervorhebung des Autors) und der praktischen Messprozedur besteht, in welcher eigentlich das Verhältnis *zweier* Größen, nämlich der zu messenden und der

Einheit, bestimmt wird. (Dementsprechend nimmt die Messung auch eine Schlüsselfunktion im Übergang von der substantiellen zur relationalen Naturauffassung in Cassirers *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* ein, siehe Cassirer 1910.) Als Bestimmung *einer* Größe könnte die Messung streng genommen nur gelten, wenn die Größe der Einheit als bekannt vorausgesetzt werden könnte, was sich aber bei Strafe eines infiniten Regresses verbietet, da sie ja durch Messung bestimmt werden müsste. Die meisten Autoren haben sich mit einem Verweis auf die relationale Natur der Größe begnügt.⁴ Karl Marx, der in der Analyse des Warentauschs als ökonomischem Messprozess die Gewichtsmessung als Analogie heranzieht, gibt hier einen bemerkenswerten Hinweis (Marx [1867] 1962: 71): In der Messung „gilt“ das Gewichtsstück als bloße Schwere oder bloße Erscheinungsform von Schwere. Das zu messende Gewicht wird mithin nicht in der abstrakten Größe der Einheit, sondern in der Einheit selbst als materiellem Körper „ausgedrückt“. Die Einheit ist umgekehrt nicht lediglich ein Naturkörper, der als Instanziierung einer abstrakten Größe betrachtet wird, sondern ein solcher, der auf diese Eigenschaft reduziert wird. In ihr lässt sich die abstrakte Größe anfassen und manipulieren. Hier zeigt sich die Quantifizierung erneut als die Herausforderung, die algebraische Handhabung von symbolischen Größen und die technische Handhabung von konkreten Größen miteinander in Einklang zu bringen oder, kurz gesagt, eine Technik zu entwickeln, Naturgegenstände nach den Regeln der Mathematik zu handhaben. Engster und Schröder (2014: 119 f.) gehen so weit, der Messung nicht bloß eine epistemische, sondern geradezu eine gegenstandskonstitutive Bedeutung zuzuschreiben. Die Messung als der doppelte Akt, „der Natur deren eigene Maße einerseits zu entnehmen, um sie andererseits an diese Maße zu halten und zu brechen“, womit die Messung als eine „ebenso bewusste wie unmittelbare (Selbst-)Reflexion“ der Natur erscheint, bringe erst die Idee einer ‘objektiven’, durch nichts als sie selbst bestimmten Natur hervor.

⁴ Edgar Wind (1934: §1) geht es bei dem von ihm konstatierten „Zirkel der Forschung“ um das Problem der „Exaktheit“ der Erkenntnis, nicht aber darum, wie

eine Größe überhaupt, das heißt unabhängig von der Frage der Exaktheit, durch ein Verhältnis zu einer anderen Größe epistemisch zugänglich wird.

4. Messung und Wissenschaft

Die Rolle der durch Messung ermöglichten Anwendung der Mathematik für die empirischen Wissenschaft ist eine nicht abschließend geklärte Frage. Kant erklärte apodiktisch: „Ich behaupte aber, daß in jeder besonderen Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft angetroffen werden könne, als darin Mathematik anzutreffen ist“ (Kant [1786] 1903: 470). In der nachkantischen, 'romantischen' Naturphilosophie hat diese Frage unterschiedliche Positionen gesehen. Alexander von Humboldt erklärt im *Kosmos*: „Der Mensch kann auf die Natur nicht einwirken, sich keine ihrer Kräfte aneignen, wenn er nicht die Naturgesetze, nach Maaß- und Zahlverhältnissen, kennt“ (Humboldt 1845: 36). In einem Brief bekennt er sich geradezu zur „Zahlenwut“: „J'ai la fureur des chiffres exacts“ (zitiert nach Knobloch 2006: 62). Goethe hingegen bestand in seiner *Farbenlehre* darauf, „daß eine Physik unabhängig von der Mathematik existire“ (Goethe 1833: 304) und polemisiert etwa gegen Tycho Brahe als Vertreter einer quantitativen Physik: „So verfährt er bey Gelegenheit der Farbe, die er nur im Vorbeygehen behandelt, weil ihm, dem alles Maß und Zahl ist, von keiner Bedeutung seyn kann“ (1810: Bd. 2, 283; vgl. Böhme 1977: 34; Müller 2015). Laut Ruben (1975: 35 f.) ist es für die romantische Naturphilosophie charakteristisch, „sich gegen die 'Rechenhaftigkeit' der Analytiker, gegen die Reduktion ihrer sinnlichen Naturerfahrung auf die analytische Kalkulation“ zu wenden. Auch die Wissenschafts- und Technikkritik der Frankfurter Schule steht noch in dieser Tradition. Georg Lukács etwa begreift die der modernen Rationalisierung eingeschriebene „Kalkulierbarkeit“ oder „Berechenbarkeit“ in der Produktion als „ein Brechen mit der organisch-irrationellen, stets qualitativ bedingten Einheit des Produktes selbst“ (Lukács 1923: 99). Auch Erich Fromm beurteilt die der Quantifizierung und Messung zugrundeliegende Abstraktion kritisch, indem er – durchaus im Licht der Marxschen Unterscheidung von „Wert“ (im Sinne von ökonomischem Wert, Tauschwert) und „Gebrauchswert“ – den intuitiven Gegensatz zum Qualitativen, Lebendigen, Emotional-Intuitiven, Unberechenbaren und Authentischen unterstreicht (Fromm [1956] 1991: 107–111). Die Quantifizierung erscheint in diesem Licht nicht bloß als Fetischismus (im Marxschen Sinne), sondern

wird von Fromm sozialpsychologisch im Sinne einer „Nekrophilie“, also einer Angezogenheit vom Leblosen gedeutet (Funk 2011).

Weder systematisch noch historisch lässt sich allerdings die Frage nach der Rolle von Messung und Mathematik für die Wissenschaft klar beantworten. Es ist lediglich festzustellen, dass manche Disziplinen der Human-, Sozial- und Kulturwissenschaften, allen voran Psychologie und Ökonomie, die Mathematisierung als Ideal akzeptiert haben, ohne dass diese Orientierung innerhalb der Fächer aber unumstritten wäre (für die Ökonomie vgl. Mirowski 1989). Auch wenn in diesen Diskussionen gegen Versuche der Quantifizierung oft die Vorstellung von originär qualitativen, sich der Quantifizierung inhärent verweigern den Phänomenen angeführt wird, bleibt diese Argumentation allein schon deshalb problematisch, weil Qualität und Quantität keinen Gegensatz bilden, sondern in der Messung ja die quantitative Ausprägung einer qualitativ bestimmten Dimension (wie Schwere, Länge, Temperatur etc.) bestimmt wird. Auf dem derzeitigen Kenntnisstand lässt sich weder die Messung als notwendig für die empirische Wissenschaft behaupten, noch umgekehrt eine apriorische Grenze der Quantifizierung verteidigen, sondern lediglich auf einer pragmatischen Ebene Erfolg und Misserfolg von Versuchen der Quantifizierung registrieren (Michell 1997; Berka 1983: 208; Schlaudt 2009b: 225 ff.).

Besonders kontrovers werden aktuell Versuche der Quantifizierung in der Ökonomie diskutiert, die als Indikatoren auch in praktischen Zusammenhängen relevant werden. Zwei Anwendungskontexte sind dabei besonders relevant: Zum einen die Qualitätskontrolle, die zuerst in privatwirtschaftlichen Firmen eingeführt, im Rahmen des sogenannten *New Public Management* in Ländern wie den USA, Großbritannien und Frankreich aber auch auf öffentliche Institutionen übertragen wurde; und zum anderen Indikatoren, die den Wohlstand oder auch den Grad der Demokratisierung und ähnliches von Nationen und Volkswirtschaften anzeigen sollen. Zu diesen Feldern ist in den vergangenen Jahren eine umfangreiche Literatur entstanden, die historisch und sozialwissenschaftlich analysiert, oft aber auch kritisch Stellung nimmt (Merry 2016; Supiot 2017; Müller 2018; Schlaudt 2018).

Basisliteratur

- Campbell, Norman Robert 1920: *Physics. The Elements*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Ellis, Brian 1968: *Basic Concepts of Measurement*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Kula, Witold 1986: *Measures and Men*. Princeton, Princeton University Press.
- Michell, Joel 1999: *Measurement in Psychology. A Critical History of a Methodological Concept*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Tal, Eran 2017: *Measurement in science*. In: Zalta, Edward N. (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2017 Edition), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/measurement-science/>.

Literatur

- Adams, George [1795] 1985: *Geometrische und graphische Versuche oder Beschreibung der mathematischen Instrumente, deren man sich in der Geometrie, der Zivil- und Militär-Vermessung, beim Nivellieren und in der Perspektive bedient*. Herausgegeben von Peter Damerow und Wolfgang Lefevre. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Archimedes: *On the equilibrium of planes* = Archimedes 2009: *On the equilibrium of planes, Book I*. In: Heath, Thomas L. (Hg.): *The Works of Archimedes: Edited in Modern Notation with Introductory Chapters*. Cambridge, Cambridge University Press: 189–202, doi:10.1017/CBO9780511695124.015.
- Aristoteles: *Mechanica* = Aristoteles 1837: *Mechanica*. In: *Aristotelis opera. Ex recensione Immanuelis Bekkeri. Accedunt indices sylburgiani. Tomus VI*. Oxford, Oxford University Press: 144–173.
- Bacon, Francis [1626] 2011: *New Atlantis: A Work Unfinished*. In: Spedding, James/Ellis, Robert Leslie/Heath, Douglas Denon (Hg.): *The Works of Francis Bacon. Volume 3: Philosophical Works 3*. Reprint der Ausgabe von 1857. Cambridge, Cambridge University Press: 125–168.
- Berka, Karel 1983: *Measurement. Its Concepts, Theories, and Problems*. Dordrecht, Kluwer.
- Böhme, Gernot 1976a: *Quantifizierung – Metrisierung*. In: *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie 7* (2): 209–222.
- Böhme, Gernot 1976b: *Quantifizierung und Instrumentenentwicklung. Zur Beziehung der Entwicklung wissenschaftlicher Begriffsbildung und Meßtechnik*. In: *Technikgeschichte 43*: 307–313.
- Böhme, Gernot 1977: *Ist Goethes Farbenlehre Wissenschaft?* In: *Studia Leibnitiana 9* (1): 27–54.
- Böhme, Gernot 1999: *Temperatur und Wärmemenge. Ein Fall alternativer Quantifizierung eines lebensweltlich-technischen Begriffs*. In: Eisenhardt, Peter/Linhard, Frank/Petanides, Kaiser (Hg.): *Der Weg der Wahrheit. Aufsätze zur Einheit der Wissenschaftsgeschichte. Festgabe zum 60. Geburtstag von Walter G. Saltzer*. Hildesheim, Olms: 217–226.
- Campbell, Norman Robert 1920: *Physics. The Elements*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Carnap, Rudolf 1926: *Physikalische Begriffsbildung*. Karlsruhe, Braun.
- Cassirer, Ernst 1910: *Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik*. Berlin, Cassirer.
- Chang, Hasok 2004: *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. Oxford, Oxford University Press.
- Courtenay, Nadine de/Darrigol, Olivier/Schlaudt, Oliver (Hg.) 2019: *The Reform of the International System of Units. Philosophical, Historical and Sociological Issues*. Abingdon, Routledge.
- Damerow, Peter 1994: *Vorüberlegungen zu einer historischen Epistemologie der Zahlbegriffsentwicklung*. In: Dux, Günter/Wenzel, Ulrich (Hg.): *Der Prozeß der Geistesgeschichte. Studien zur ontogenetischen und historischen Entwicklung des Geistes*. Frankfurt/M., Suhrkamp: 248–322.
- Descartes, René 1644: *Principia Philosophiæ*. Amsterdam, Elsevir.
- Descartes, René 1647: *Principes de la philosophie, ecrits en Latin par René Descartes et traduits en Francois par un des ses amis*. Paris, Le Gras.
- Duhem, Pierre 1905/1906: *Les origines de la statique*. 2 Bände. Paris, Hermann.
- Dürer, Albrecht 1525: *Vnderweysung der Messung mit dem Zirckel vnd Richtscheyt in Linien, Ebenen vnd gantzen Corporen*. Nürnberg, Andreae.
- Dunshirn, Alfred 2019: *Physis* [deutschsprachige Fassung]. In: Kirchhoff, Thomas (Hg.): *Online Encyclopedia Philosophy of Nature/Online Lexikon Naturphilosophie*.

- Universitätsbibliothek Heidelberg, Heidelberg: <https://doi.org/10.11588/oePN.2019.0.65543>.
- Einstein, Albert 1905: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: *Annalen der Physik* 17: 891–921.
- Ellis, Brian 1968: *Basic Concepts of Measurement*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Engster, Frank/Schröder, Andreas 2014: Maß und Messung. Die Naturalisierung von Gesellschaft und Natur. In: *Zeitschrift für kritische Sozialtheorie und Philosophie* 1 (1): 109–147.
- d’Errico, Francesco/Doyon, Luc/Colagé, Ivan/Queffelec, Alain/Le Vraux, Emma/Giacobini, Giacomo/Vandermeersch, Bernard/Maureille, Bruno 2017: From number sense to number symbols. An archaeological perspective. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373 (1740): 20160518, <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0518>.
- Falkenburg, Brigitte 1997: Incommensurability and measurement. In: *Theoria* 12 (3): 467–491.
- Falkenburg, Brigitte 2017: Mathematisierung der Natur und ihre Grenzen. In: Kirchhoff, Thomas/Karafyllis, Nicole C./Evers, Dirk/Falkenburg, Brigitte/Gerhard, Myriam/Hartung, Gerald/Hübner, Jürgen/Köchy, Kristian/Krohs, Ulrich/Potthast, Thomas/Schäfer, Otto/Schiemann, Gregor/Schlette, Magnus/Schulz, Reinhard/Vogelsang, Frank (Hg.): *Naturphilosophie. Ein Lehr- und Studienbuch*. Tübingen, UTB/Mohr Siebeck: 32–41.
- Freudenthal, Gideon 1999: Leibniz als Transzendentalphilosoph malgré lui. Der Status der Erhaltungssätze. In: *Studia Leibnitiana – Sonderhefte* 29: 9–29.
- Fromm, Erich [1956] 1991: *The Sane Society*. With an Introduction by David Ingleby. London/New York, Routledge.
- Funk, Rainer 2011: *Der entgrenzte Mensch. Warum ein Leben ohne Grenzen nicht frei, sondern abhängig macht*. Gütersloh, Gütersloher Verlagshaus.
- Galilei, Galileo [1623] 1977: *Il saggiaatore (The Assayer)*. In: *Opere de Galileo Galilei. Parte 3a, Tomo 15: Astronomia*. Turin, Einaudi.
- Galilei, Galileo 1957: *Discoveries and Opinions of Galileo*. Translated with an Introduction and Notes by Stillman Drake. Garden City/NY, Doubleday Anchor Books.
- Gibson, James J. 1979: *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, Houghton Mifflin.
- Gilbert, Milton/Clark, Colin/Stone, J. R. N./Perroux, François/Lieu, D. K. 1949: The measurement of national wealth: discussion. In: *Econometrica* 17 (Supplement: Report of the Washington Meeting): 255–272.
- Goethe, Johann Wolfgang von 1810: *Zur Farbenlehre*. 2 Bände. Tübingen, Cotta.
- Goethe, Johann Wolfgang von 1833: *Confession des Verfässers (Geschichte der Farbenlehre, Zweyter Theil, 5. Abteilung)*. In: *Goethe’s Werke. Vollständige Ausgabe letzter Hand*, 54. Band (= Goethe’s nachgelassene Werke, 14. Band). Stuttgart/Tübingen, Cotta: 282–310.
- Goodman, Nelson 1983: *Fact, Fiction, and Forecast*. 4th Edition. Cambridge/MA, Harvard University Press.
- Gorham, Geoffrey/Hill, Benjamin/Slowik, Edward/Waters, C. Kenneth (Hg.) 2016: *The Language of Nature. Reassessing the Mathematization of Natural Philosophy in the Seventeenth Century*. Minneapolis, University of Minnesota Press.
- Heidelberg, Michael 1993: *Das Innere der Natur*. Gustav Theodor Fechners wissenschaftlich-philosophische Weltauffassung. Frankfurt/M., Klostermann.
- Heisenberg, Werner [1967] 1973: *Das Naturgesetz und die Struktur der Materie*. In: Heisenberg, Werner: *Schritte über Grenzen. Gesammelte Reden und Aufsätze*. München, Piper: 223–242.
- Helmholtz, Hermann von 1887: *Zählen und Messen, erkenntnistheoretisch betrachtet*. In: Helmholtz, Hermann von: *Philosophische Aufsätze, Eduard Zeller zu seinem fünfzigjährigen Doctorjubiläum gewidmet*. Leipzig, Fues’s Verlag: 17–52. [Wiederabdruck in Schlaudt 2009a].
- Humboldt, Alexander von 1845: *Kosmos. Versuch einer physischen Weltbeschreibung*. Band 1. Stuttgart/Tübingen, Cotta.
- Hyginus [Gromaticus] 2018: *Das Feldmesserbuch [De limitibus constituendis]*. Ein Meisterwerk der spätantiken Buchkunst. Herausgegeben von Jens-Olaf Lindermann, Eberhard Knobloch und Cosima Möller. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Janich, Peter 1980: *Die Protophysik der Zeit. Konstruktive Begründung und Geschichte der Zeitmessung*. Frankfurt/M., Suhrkamp.
- Janich, Peter 1989: *Euklids Erbe. Ist der Raum dreidimensional?* München, Beck.
- Janich, Peter 1997: *Das Maß der Dinge. Zur Protophysik von Raum, Zeit und Materie*. Frankfurt/M., Suhrkamp.
- Janovskaja, Sof’ja A. [1936] 2011: Über die sogenannten ‘Definitionen durch Abstraktion’. In: *Beiträge zur Marx-Engels-Forschung. Neue Folge* 2011: 95–136.

- JCGM – Joint Committee for Guides in Metrology 2012: International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd Edition. International Bureau of Weights and Measures, https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf.
- Kant, Immanuel [1786] 1903: *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*. In: *Kant's gesammelte Schriften*. Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Band 4. Berlin, Reimer.
- Kepler, Johannes [1616] 1864: Auszug aus der uralten Messe-Kunst Archimedis. In: *Kepler, Johannes: Opera Omnia*. Band 5. Herausgegeben von Christian Frisch. Frankfurt/M. & Erlangen, Heyder & Zimmer: 495–610.
- Knobloch, Eberhard 2006: Erkundung und Erforschung. Alexander von Humboldts Amerikareise. In: *HiN – Alexander von Humboldt im Netz VII (13)*: 55–72.
- Krantz, David H./Luce, R. Duncan/Suppes, Patrick/Tversky, Amos 1971–1990: *Foundations of Measurement*. 3 Bände. New York, Academic Press.
- Kula, Witold 1986: *Measures and Men*. Princeton, Princeton University Press.
- Lorenzen, Paul 1987: *Constructive Philosophy*. Amherst, University of Massachusetts Press.
- Lukács, Georg 1923: *Geschichte und Klassenbewusstsein. Studien über marxistische Dialektik*. Berlin, Malik.
- Mach, Ernst 1896: *Prinzipien der Wärmelehre*. Leipzig, Barth.
- Magurran, Anne E. 2004: *Measuring Biological Diversity*. Oxford, Blackwell.
- Marx, Karl [1867] 1962: *Das Kapital. Zur Kritik der politischen Ökonomie*. In: *Karl Marx und Friedrich Engels, Werke*, Band 23. Berlin, Dietz.
- McLaughlin, Peter 1994: Die Welt als Maschine. Zur Genese des neuzeitlichen Naturbegriffs. In: Grote, Andreas (Hg.): *Macrocosmos in Microcosmo. Die Welt in der Stube. Zur Geschichte des Sammelns 1450 bis 1800*. Opladen, Leske und Budrich: 439–451.
- McLaughlin, Peter 1996: vis viva. In: Mittelstraß, Jürgen (Hg.): *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, Band 4. Stuttgart, Metzler: 550–551.
- McLaughlin, Peter/Schlaudt, Oliver 2020: Real abstraction in the history of the natural sciences. In: Oliva, Antonio/Oliva, Angel/Novara, Iván (Hg.): *Marx and Contemporary Critical Theory: The Philosophy of Real Abstraction*. London, Palgrave MacMillan: 307–317.
- Merry, Sally Engle 2016: *The seduction of quantification. Measuring human rights, gender violence, and sex trafficking*. Chicago, University of Chicago Press.
- Michell, Joel 1997: Quantitative science and the definition of measurement in psychology. In: *British Journal of Psychology* 88: 355–383.
- Michell, Joel 1999: *Measurement in Psychology. A Critical History of a Methodological Concept*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Minkowski, Hermann 1909: Raum und Zeit. In: *Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 18: 1–14.
- Mirowski, Philip 1989: *More Heat than Light: Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Moody, Ernest A./Clagett, Marshall 1952: *The Medieval Science of Weights (Scientia de ponderibus): treatises ascribed to Euclid, Archimedes, Thabit ibn Qurra, Jordanus de Nemore and Blasius of Parma*, edited with an introduction, English translation, and notes. Madison, University of Wisconsin Press.
- Muller, Jerry Z. 2018: *The Tyranny of Metrics*. Princeton, Princeton University Press.
- Müller, Olaf L. 2015: „Mehr Licht“. Goethe mit Newton im Streit um die Farben. Frankfurt/M., S. Fischer.
- Neal, Katherine 2002: *From Discrete to Continuous. The Broadening of the Number Concept in Early Modern England*. Dordrecht, Kluwer.
- Neumann, John von 1932: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin, Springer.
- Nissen, Hans J./Damerow, Peter/Englund, Robert K. 1993: *Archaic Bookkeeping: Early Writing and Techniques of Economic Administration in the Ancient Near East*. Chicago, University of Chicago Press.
- Overmann, Karenleigh A. 2014: Fingercounting in the upper Palaeolithic. In: *Rock Art Research* 31 (1): 63–80.
- Renn, Jürgen/McLaughlin, Peter 2018: The balance, the lever and the Aristotelian origins of mechanics. In: Feldhay, Rivka/Renn, Jürgen/Schemmel, Matthias/Valleriani, Matteo (Hg.): *Emergence and Expansion of Pre-Classical Mechanics*. New York, Springer: 111–137.
- Ruben, Peter 1975: Die romantische Naturphilosophie – Standort und Grenzen. In: *Wissenschaft und Fortschritt* 25 (1): 32–37.
- Russell, Bertrand 1897: On the relations of number and quantity. In: *Mind* VI: 326–341.

- Schlaudt, Oliver (Hg.) 2009a: Die Quantifizierung der Natur. Klassische Texte der Messtheorie von 1696 bis 1999. Paderborn, Mentis.
- Schlaudt, Oliver 2009b: Messung als konkrete Handlung. Eine kritische Untersuchung über die Grundlagen der Bildung quantitativer Begriffe in den Naturwissenschaften. Würzburg, Königshausen und Neumann.
- Schlaudt, Oliver 2018: Die politischen Zahlen. Über Quantifizierung im Neoliberalismus. Frankfurt/M., Klostermann.
- Stevens, Stanley S. 1946: On the theory of scales of measurement. In: *Science* 103 (2684): 677–680. [Deutsche Übersetzung in Schlaudt 2009a].
- Stevin, Simon [1586] 1955: De Beghinselen der Weeghconst. (The Elements of the Art of Weighing). In: Dijksterhuis, E. J. (Hg.): *The Principal Works of Simon Stevin. Volume 1: General Introduction. Mechanics.* Amsterdam, Swets & Zeitlinger: 35–47.
- Supiot, Alain 2017: *Governance by Numbers. The Making of a Legal Model of Allegiance.* Haywards Heath, Hart Publishing.
- Tal, Eran 2017: Measurement in science. In: Zalta, Edward N. (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2017 Edition), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/measurement-science/>.
- van der Waerden, Bartel L. 1985: *A History of Algebra. From al-Khwārizmī to Emmy Noether.* Berlin, Springer.
- van Fraassen, Bas C. 2008: *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective.* Oxford, Clarendon Press.
- Vatn, Arild 2000: The environment as a commodity. In: *Environmental Values* 9 (4): 493–509.
- Waring, Marilyn 1988: *If Women Counted. A New Feminist Economics.* San Francisco, Harper and Row.
- Wigner, Eugene P. 1960: The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. In: *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13 (1): 1–14.
- Wind, Edgar 1934: *Das Experiment und die Metaphysik. Zur Auflösung der kosmologischen Antinomien.* Tübingen, Mohr.
- Winter, Thomas Nelson 2007: *The Mechanical Problems in the Corpus of Aristotle.* Lincoln, University of Nebraska-Lincoln, Faculty Publications, Classics and Religious Studies Department, <https://digitalcommons.unl.edu/classicsfacpub/68>.
- Wolff, Christian [1763] 1962: *Philosophia prima, sive Ontologia, methodo scientifica pertractata, qua omnis cognitionis humanae principia continentur.* In: Wolff, Christian: *Gesammelte Werke, II. Abteilung: Lateinische Schriften, Band 03.* Herausgegeben und bearbeitet von Jean École. Hildesheim, Olms.