

Wie die Mathematik ihre erstaunliche Formkraft gewinnt

Rezension zu Gabriele Gramelsberger: *Operative Epistemologie: (Re-)Organisation von Anschauung und Erfahrung durch die Formkraft der Mathematik*, Meiner Verlag, Hamburg 2020, 435 Seiten.

Dass moderne Naturwissenschaft und Technik ohne Mathematik nicht möglich wären, ist ein Gemeinplatz, der fraglos richtig ist, bei näherer Betrachtung jedoch grundlegende Fragen aufwirft. Der mathematische Physiker Eugene Wigner (1902–1995) spricht in diesem Zusammenhang von der »unvernünftigen Effektivität der Mathematik in den Naturwissenschaften«¹ und bezieht sich damit auf die bestaunenswerte Tatsache, dass reine Geisteskonstrukte wie mathematische Theorien sich mit verblüffender Regelmäßigkeit auf die empirische Wirklichkeit anwenden lassen; Ernst Cassirer, in seinem Aufsatz »Kant und die moderne Mathematik« (1907) wendet dies in die normative Forderung, die logischen und mathematischen Begriffe sollten »nicht länger die Werkzeuge bilden, mit denen wir eine metaphysische ›Gedankenwelt‹ aufbauen«; vielmehr hätten sie »ihre Funktion und ihre berechtigte Anwendung lediglich innerhalb der *Erfahrungswissenschaft* selbst«.² Nun ist die Auffassung von Mathematik als einem Erkenntniswerkzeug in der Philosophiegeschichte zwar nichts Neues, und bisweilen ist die Mathematik zum Erkenntnisideal (vgl. Descartes' ›more geometrico‹) erklärt worden. Doch weder die Auffassung von Mathematik als regulativem Erkenntnisideal noch als bloßem ›Werkzeug‹ wird dabei jedoch deren Charakter als Triebkraft mit einer eigenständigen Dynamik, die ganze Bereiche in Wissenschaft, Technik und Lebenswelt

1 Eugene P. Wigner: »The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences«, in: *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13 (1960), Heft 1, S. 1–14.

2 Ernst Cassirer: »Kant und die moderne Mathematik«, in: *Kant-Studien* 12 (1907), Heft 1–3, S. 1–49, hier S. 43.

zu formen vermag, gerecht.³ Durch zunehmende Emanzipation vom Kriterium der Anschaulichkeit und die Hinwendung zu operationalisierbaren Verfahren hat sich die Mathematik im Laufe ihrer Entwicklung selbst neue Ressourcen erschlossen, die ihrerseits richtungsweisend auf Wissenschaft und Technik zurückgewirkt haben. In ihrer lesenswerten und ebenso materialreichen wie anregenden Habilitationsschrift, *Operative Epistemologie: (Re-)Organisation von Anschauung und Erfahrung durch die Formkraft der Mathematik* (Hamburg: Meiner 2020), widmet sich Gabriele Gramelsberger der Frage, was genau diese mathematische ›Formkraft‹ ausmacht und wie deren Anerkenntnis den philosophischen Blick auf das Verhältnis von Philosophie, Mathematik, Wissenschaft und Technik verändert bzw. verändern sollte.

Denn kratzt man auch nur ein wenig an der Oberfläche des Wechselverhältnisses zwischen Philosophie und Mathematik, so tun sich schnell Risse auf, die auf tiefliegende Spannungen hinweisen – die wiederum nicht nur von Konfliktpotential zeugen, sondern auch von der enormen Produktivität, die sich aus der Interaktion von mathematischem und philosophischem Denken, auch und gerade in seiner Anwendung auf technisch-wissenschaftliche Weltverhältnisse, ergeben: So mokiert sich Platon im siebenten Buch des *Staates* über diejenigen, die von Berufs wegen Geometrie betrieben, da sie dies bloß ›handwerksmäßig‹ täten und nicht mit dem Ziel höherer philosophischer Einsicht: »[G]erade als verrichteten sie eine mechanische Arbeit und als machten sie nur dieser Arbeit wegen alle ihre Demonstrationen, sprechen sie nur von quadrieren, prolongieren, addieren und wie alle diese ihre Ausdrücke lauten, während doch die ganze Wissenschaft einer geistigen Erkenntnis wegen betrieben wird«.⁴ Im Gegenzug macht sich Aristoteles über die Pythagoreer lustig, die in ihrem Versuch, die kosmische Ordnung in Zahlen zu fassen, der Zahl Zehn (als Summe der ›Vierheit‹ $1+2+3+4$) einen besonderen Stellenwert beimaßen: »Aber weil lediglich neun [Planeten] sichtbar sind«, so Aristoteles, »erdachten sie sich als zehnten die ›Gegenerde««.⁵ In beiden Fällen lassen sich Aspekte der entsprechenden philosophischen Grundhaltungen als problematisch identifizieren: Zum einen die Herabsetzung der Frage nach der *Anwen-*

3 Zur neueren Diskussion über die Rolle von Mathematik als wissenschaftlichem Werkzeug vgl. Johannes Lenhard und Martin Carrier (Hg.): *Mathematics as a Tool: Tracing New Roles of Mathematics in the Sciences*, Berlin, New York 2017.

4 Platon, *Politeia*, 527a.

5 Aristoteles, *Metaphysik*, I 5, 986a 8.

dung mathematischen Wissens, wie sie sich konkret in mathematischen Handlungen (eben jenem ›Quadrieren, Prolongieren, Addieren‹) vollzieht⁶ – zum anderen die Vermessenheit der Erwartung, Ordnung in der Welt erzwingen zu können, indem man dieser ein für perfekt (oder ›elegant‹) befundenes mathematisches System überzustulpen meint.

In ihrer Einleitung stellt Gramelsberger Aristoteles' Kritik an den Pythagoreern historisch in eine Reihe mit anderen Beispielen der Wissenschaftsgeschichte von jener »eigenwillige[n] Allianz zwischen Mathematik, Naturspekulation und Ästhetik«, die immer wieder »Fragen nach den Konstellationsverhältnissen von Anschauung, Erfahrung und mathematischer Formkraft«⁷ aufgeworfen haben und dies – man denke an den spekulativen Charakter zeitgenössischer Superstringtheorien in der Physik – bis heute tun.

Drei zentrale Fragenkomplexe stehen im Mittelpunkt der Diskussion: Da ist zum einen die Frage, wie (und inwieweit) Mathematik Wissen verfügbar macht und als objektiv absichert – genuin mathematisches Wissen ebenso wie (auf dem Umweg der mathematisierten Wissenschaften) Wissen über Zusammenhänge in der empirischen Welt. Dieser *Erkenntnisfrage* an die Seite gestellt wird die *Anwendungsfrage*, die selbst eng verwoben ist mit philosophischen Grundpositionen, welche das Wesen mathematischen Wissens betreffen: Fasst man mathematisches Wissen als Wissen über von der Erfahrungswelt unabhängige abstrakte Entitäten auf, so bleibt rätselhaft, wie letztere auf die Welt überhaupt Einfluss nehmen können. Hält man dagegen mathematisches Wissen für ein von uns geschaffenes Instrument zum bloßen Ordnen unserer Erfahrungen, so bleibt unerklärlich, wieso mathematische Begrifflichkeiten an entscheidenden Stellen – etwa der Wissenschaftsentwicklung – eine Eigendynamik aufweisen, die weit über das hinausgeht, was plausiblerweise als empirischer ›Input‹ vorausgesetzt werden kann. Neben diesem *allgemeinen* Anwendungsproblem lässt sich überdies die – gewissermaßen intramathematische – Frage speziell nach

6 Zur Frage, inwieweit die Praxis der Mathematik darüber hinaus durch weitere epistemische Handlungen konstituiert ist, siehe u.a. Axel Gelfert, »Thinking with Notations: Epistemic Actions and Epistemic Activities in Mathematical Practice«, in: Michael Friedman und Karin Krauthausen (Hg.): *Model and Mathematics: From the 19th to the 21st Century*, Basel 2022, S. 333–362.

7 Gabriele Gramelsberger: *Operative Epistemologie: (Re-)Organisation von Anschauung und Erfahrung durch die Formkraft der Mathematik*, Hamburg 2020, S. 11. – Alle nachfolgenden Seitenzahlen beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, auf dieses Werk.

dem Stellenwert der *angewandten Mathematik* für die in diesem Zusammenhang verhandelten philosophischen Fragen aufwerfen. Insbesondere nominalistische Positionen neigen dazu, nicht nur zu leugnen, dass der Erfolg der angewandten Mathematik in irgendeiner Hinsicht einer Erklärung bedürfe, sondern auch, dass es im Dunstkreis des Anwendungsproblems überhaupt genuin philosophische Fragen gäbe: »there are no genuine philosophical problems to be found in the success of applied mathematics«, meint etwa Jody Azzouni.⁸

Dass diese Abwehrhaltung vorschnell ist, zeigt sich dann, wenn man einen dritten Fragenkomplex in den Blick nimmt: die »Medialitätsfrage« (S. 11). Denn gleich welche Haltung man etwa gegenüber der Ontologie mathematischer Phänomene einnimmt, mindestens vom Standpunkt der *mathematischen Praxis* aus ist jede Beschäftigung mit der Mathematik immer schon medial vermittelt. Dies gilt um so mehr für die moderne Mathematik, die sich vom Primat der Anschauung gelöst hat. Erst durch die »weitgehende Ausschaltung des anschaulichen Elements« (S. 23) findet die Mathematik gewissermaßen zu sich selbst. Ein erster Schritt in diese Richtung findet bereits in der Antike mit der Etablierung der axiomatisch-deduktiven Methode statt; weitere folgen, etwa durch die Arithmetisierung der Geometrie und die Übersetzung von Kurven im Raum in algebraische Zusammenhänge. Dem Kriterium der geometrischen Konstruierbarkeit wird zunächst die Forderung nach algebraischer Berechenbarkeit an die Seite gestellt; später kommt, auch als Reaktion auf die intrinsischen Limitationen algebraischer Herangehensweisen (wie seinerzeit etwa von Lagrange nachgewiesen), eine Vielzahl von mathematischen Neuentwicklungen, so u.a. der Gruppentheorie hinzu. Von Anschaulichkeit und Anschauung in einem intuitiven Sinne lässt sich hier nicht mehr sprechen; vielmehr zeigt sich an der Entwicklung weiter Teile der Mathematik der letzten zweihundert Jahre, wie sehr den Notationen, Kalkülen und (mathematisch interpretierten) Symbolsystemen ein Eigenleben zukommt. Im ersten Teil ihrer Arbeit (»Operationalisierung der Erfahrung«) skizziert Gramelsberger eben diese historische Entwicklung zunehmender Abstraktion und Akzentverschiebung hin zu einer »Akteurialität des Symbolischen« (S. 189).

An verschiedenen Stellen verweist Gramelsberger in diesem Zusammenhang zu Recht auf Cassirer als Gewährsmann, der in seiner *Philosophie der*

8 Jody Azzouni: »Applying Mathematics: An Attempt to Design a Philosophical Problem«, in: *The Monist* 83 (2000), Heft 2, S. 209–227, hier S. 209.

symbolischen Formen von einer ›Kraft der Verdichtung‹ in mathematischen Symbolsystemen spricht: »Es ist, als würde durch die Schöpfung des neuen Symbols eine gewaltige Energie des Denkens aus einer relativ diffusen Form in eine konzentrierte Form übergeführt.«⁹ Wie Gramelsberger an einer Vielzahl von Beispielen – über das von Cassirer bemühte Beispiel des Differentialkalküls hinaus – argumentiert, »kumuliert im Symbol der zugrundeliegende Algorithmus respektive Kalkül« (S. 190), so dass mathematischer Fortschritt sich nicht mehr an der Rückführbarkeit auf Anschaulichkeit messen lassen muss, sondern sich an »Verfeinerungen und Modifikationen« der Kalküle und Notationen selbst zeigt, die sich wiederum »als Kalibrierung von Erkenntnismittel und Erkenntnisform verstehen« lassen (ebd.). Eine zentrale Rolle in dieser historischen Traditionslinie kommt Immanuel Kants Konzeption der Anschauung a priori zu, die der sinnlichen Anschaulichkeit vorausgeht und zugleich der reinen Anschauungsformen von Zeit und Raum bedarf. In dieser Ablösung der Anschauung vom Bezug auf die sinnlichen Gegenstände sieht Gramelsberger eine »Analogie zum operativen Symbolismus [...], aber auch zur distinkten Imagination bei Leibniz« (S. 84), die mithin beide als Wegbereiter eines »Programm[s] der Erfahrungssicherung der neuzeitlichen Wissenschaft« angesehen werden können, das »sich ontologisch nicht mehr im Sein, sondern in der Mathematik und dem empirisch Gegebenen gründet« (S. 13).

Im zweiten Teil des Buches (»Verlust der Anschauung«) werden in einem Dreischritt die Konsequenzen dieser globalen Entwicklung für die Mathematik selbst (Kapitel 5), für das Verständnis physikalischer Grundbegriffe (Kapitel 6) und für die wechselseitige Befruchtung zwischen beiden (Kapitel 7) anhand ausgewählter Beispiele (u.a. des sich historisch auffächernden Symmetriebegriffs in der Physik) diskutiert. Insbesondere in der modernen Physik rückt dabei zusätzlich zu den bereits angerissenen Verschiebungen im Anschauungsbegriff auch eine ›apparative Anschauung‹ in den Fokus, die durch Delegieren der traditionellen Funktionen von Anschauung an zunehmend präzisere Messinstrumente gekennzeichnet ist. Zentrale Beispiele hierfür sind zum einen – im Modus des Gedankenexperiments – die Umdeutung des Gleichzeitigkeitsbegriffs in der Relativitätstheorie und der quantenmechanische Messvorgang; so ist es, Gramelsberger zufolge, die »Verquickung von symbolischer und apparativer Anschauung in ein und demselben wissenschaftlichen Begriff«, die durch »apriorisch-synthetische

9 Ernst Cassirer: *Philosophie der symbolischen Formen* (Bd. 3/1929), Darmstadt 1990, S. 469.

Operabilisierung« etwa des Ununterscheidbarkeitsbegriffs es überhaupt erst ermöglicht, »[moderne] Physik als Wissenschaft zu betreiben« (S. 181).

Der dritte Teil des Buches (»Mathematische Sprachpragmatik«) kann einerseits verstanden werden als Weiterführung einer die Medialität mathematischer Praxis in den Mittelpunkt stellenden Geschichte intramathematischer Entwicklungen, andererseits als Beginn einer klareren Konturierung dessen, was mit dem Begriff der »Akteurialität des Symbolischen« gemeint ist. Beide Aspekte greifen dahingehend ineinander, dass sich historisch die symbolisch-operative Herangehensweise sowohl von intuitiven Vorstellungen von Anschaulichkeit emanzipiert als auch von seinen philosophischen Verfeinerungen (vgl. Kant) und vergleichbaren Substituten. Wenn aber das Symbolische »nicht nur Beiwerk, sondern notwendiges Erkenntnismittel mathematischer Rationalität ist, dann bedeutet ein medialer Wechsel der symbolischen Verfassung einen Wandel der mathematischen [...] Erkenntnis- und Formkraft« (S. 185f.). Dabei richtet sich, von der Zahlentheorie bis hin zu metamathematischen Problemen, die Neuausrichtung der mathematischen Erkenntnismittel auf »zeichensprachlich-artikulierbare Denkgesetze« (S. 197) – was das Projekt einer logischen Begründung der Mathematik überhaupt erst realistisch erscheinen lässt, dient doch die Logik nicht mehr nur zur lückenlosen Beweisführung, sondern zielt vielmehr darauf ab, die mathematischen Entitäten selbst mit logischen Mitteln zu konstituieren.

Es versteht sich, dass die hier skizzierte Entwicklung nicht geradlinig und unwidersprochen abläuft, sondern durch Komplexität und zum Teil gegenläufige Motivationen der maßgeblichen Akteure bestimmt ist; Trennschärfe und Eindeutigkeit ergibt sich bestenfalls im Nachhinein durch rationale Rekonstruktion solcher Episoden. Diese Komplexität der historischen Debatte wird von Gramelsberger exemplarisch abgebildet, auch wenn ebenso nachvollziehbar der Schwerpunkt auf bekannte Figuren wie etwa David Hilbert gelegt wird, dessen programmatische *Neubegründung der Mathematik* (1922) als wichtiges Zwischenergebnis der skizzierten Entwicklung gelten kann. So fasst Hilbert, ganz im Sinne einer Hinwendung zum Symbolischen, die »eigentliche Mathematik« als »einen Bestand an beweisbaren Formeln« auf, wodurch auch erstmals bewusst die Notwendigkeit der Abtrennung metamathematischer Fragen anerkannt wird – so

etwa die Frage der Widerspruchsfreiheit der Axiome.¹⁰ Das Problem der Berechenbarkeit, die Gramelsberger zufolge durchaus »als neues Anschauungsparadigma« (S. 228) bzw. als Substitut für Anschaulichkeit gehandelt werden kann, nimmt ebenfalls breiten Raum ein (Kapitel 10), zumal sich damit unmittelbar die Frage nach deren Operationalisierbarkeit stellt: So kann das »tatsächliche Durchspielen endlich vieler Möglichkeiten, um zu einer Entscheidung zu gelangen« eine Möglichkeit sein, »Berechenbarkeit konkret umzusetzen« (S. 240). Die am Ende von Kapitel 10 angesiedelte Diskussion von Fragen der Computersimulation und der Rede von »Chaos« in deterministischen, nicht-linearen Gleichungen ist trotz ihres Exkurs-Charakters in diesem Zusammenhang instruktiv, bietet sie doch einen Anknüpfungspunkt dafür, wie eine Übertragung der Hinwendung zum Symbolisch-Operativen auf mathematiknahe Diskurse in den Nachbarwissenschaften aussehen könnte.

Im vierten Teil (»Operative Epistemologie«) werden genau solche außer-mathematischen Bezüge stärker in den Vordergrund gerückt; die von Gramelsberger monierte Abstraktheit und Isoliertheit jüngerer Diskussionen analytischer Provenienz zum »applicability problem« der Mathematik lässt sich nur dann überwinden, wenn man »den Fokus von der im Mathematikphilosophischen üblichen ontologisch-dichotomen Fragestellung auf die Frage nach den Verwirklichungs- und Realisierungsbedingungen der Mathematik« (S. 277) verschiebt. Angewandte Mathematik ist eben nicht bloß, aller latenten philosophischen Vorliebe für Isomorphierelationen zum Trotz, eine hochkomplexe, ausgefeilte Abbildung der Welt mit mathematischen Mitteln – zumindest nicht *nur* bzw. nicht *im Regelfall* – sondern eine Verwirklichung symbolisch-operativer Prozesse, die im Erfolgsfall die Ordnung und Organisation von (z.T. apparativ vermittelten) Erfahrungsbeständen ermöglichen. Der Erfolg mathematischer Anwendung, so könnte man leicht verkürzend paraphrasieren, ist dann gegeben, wenn der »Möglichkeitsraum mathematisierter Theorien« und der »Realisierungsraum mathematisierter Apparate« (S. 277) auf produktive Weise zusammenstimmen.

Was die sich so operativ realisierende Formkraft der Mathematik an Erkenntnisfortschritt für die mathematisierten Naturwissenschaften mit sich bringt, wird von Gramelsberger an einer Reihe von Fallbeispielen diskutiert. Ein solches ist die Meteorologie, die gleich zweierlei illustriert: ers-

10 David Hilbert: »Neubegründung der Mathematik. Erste Mitteilung«, *Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universität Hamburg* 1 (1922), S. 147–177, hier S. 174.

tens den Wandel von einem statischen Ideal der Repräsentation zu einem dynamischen Ideal der Vorhersage, zweitens die prognostische Leistungsfähigkeit symbolisch-operativer Mathematisierung. Denn, so argumentiert Gramelsberger: In dem Moment (und, wird man ergänzen dürfen: in dem Maße) wie »Meteorologie über ein mathematisiertes Prozessobjekt als ihr Wissensobjekt verfügt, wird sie prognostisch, insofern sich die mathematische Operativität durch Berechnung ›in Gang setzen‹ lässt« (S. 288). Weitere Beispiele, u.a. aus der Strukturchemie, der Festkörperphysik sowie (später, im fünften Teil des Buches) der Systembiologie, runden das Bild ab und sollen belegen, dass »die maßgebliche Leistung der Formatierung einer Theorie in eine mathematisierte Theorie – also operationale Theorie – in der Transformation der Wissensobjekte in mathematisierte Prozessobjekte« besteht (S. 297). Mit der Operationalisierung wissenschaftlicher Theorien als mathematische Konstrukte erweitert sich auch der Geltungsanspruch bzw. -bereich der betreffenden Theorien: »Meteorologie wird zu einer allgemeinen Theorie der Zirkulation und Chemie wird zu einer allgemeinen Theorie chemischer Reaktivität« (S. 298). Um den so erweiterten Rahmen darstellbarer Möglichkeiten, Szenarien und Prozesse wieder auf ein mit unseren Erkenntnisinteressen – nicht zuletzt unserem Wunsch, die Dinge zu *verstehen* – verträgliches Maß zurechtzustutzen, bedarf es systematischer Verfahren, die jedoch interessanterweise durch die Mathematisierung selbst bereits mitgeliefert werden: man denke etwa an Extremalprinzipien, die gemäß dem Prinzip der kleinsten Wirkung aus der Fülle möglicher Szenarien die in der Realität erwartbaren bestimmen.

Gramelsberger beschließt ihre Untersuchung mit einem – wie alle Teile des Buchs drei Kapitel umfassenden – fünften Teil, dessen Titel, »Theorie der operativen Epistemologie«, bereits ein selbstreflexives Moment anklingen lässt. Inwieweit, so stellt sich im Verlauf der Lektüre des Buchs die Frage, addieren sich die zahlreichen historischen Wendungen, Verästelungen und Globaltendenzen im Verhältnis der Mathematik zu Philosophie, Wissenschaft und Empirie zu einer umfassenderen *Epistemologie*, die das Fundament bzw. Gerüst unseres (wissenschaftlichen) Wissens von der Welt insgesamt verändert? Einen Hinweis liefert die Parallele zu anderen zentralen Modi der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung, insbesondere dem wissenschaftlichen Experiment. Zum einen – hierin schließt Gramelsberger an Gaston Bachelard an – tragen Experimente und Messungen als gewissermaßen »realisierte Theorien« [...] die »Prägemale« der mathematisierten Theorie in sich« (S. 325), zum anderen vereinen sowohl das wissenschaft-

liche Experiment als auch mathematisch operationalisierte Theorien »erkenntnis- wie handlungstheoretische Momente in sich« (S. 324). Während die Wissenschaftstheorie lange Zeit das Experiment als bloßes Instrument zur Überprüfung und Bestätigung von Theorien betrachtet hat, so sind in den letzten Jahrzehnten, beeinflusst durch zahlreiche Fallstudien aus der Wissenschaftsgeschichte, weitere erkenntnisleitende Funktionen im Sinne des explorativen Experimentierens, des Kalibrierens und der Präzisierung bestehender wissenschaftlicher Begriffe in den Fokus gerückt.¹¹ Auch der Mathematik kommen solche erkenntnisleitenden Funktionen zu, und es könnte eine lohnende Aufgabe zukünftiger, auf Gramelsbergers Ansatz aufbauender Forschung sein, zu eruieren, inwieweit es gerade diese erkenntnisleitenden Funktionen sind, die die ›Formkraft‹ der Mathematik im Bereich von Wissenschaft und Technik ausmachen. Anders als Kalibrierung und Experimentieren, durch die lediglich eine »Spezifizierung singulärer Objekte« erfolgt, macht die mathematische Rationalität eine »Komplettierung bestehender wissenschaftlicher Begriffe« möglich, indem der gesamte Möglichkeitsraum einer mathematisierten Theorie ausgeschöpft wird (S. 340). Mathematisierung wird so zur verbindenden Klammer eines jeden wissenschaftlichen Allgemeinheitsanspruchs.

Angesichts der enormen Spannweite der diskutierten historischen Entwicklungen, wissenschaftlichen Fallbeispiele, und Grundlagenfragen ist es nur legitim, wenn Gramelsberger gegen Ende des Bandes die Frage aufwirft, was sich daraus für die zukünftige Wissenschaftsentwicklung ergibt – wird sich »die mathematische Rationalität noch weiterentwickeln« oder ist sie »als rein formalsprachliche Technik an ihre Grenzen gelangt« (S. 383)? Jede Antwort darauf ist notwendigerweise spekulativ und damit risikobehaftet. Nun weist Gramelsberger darauf hin, dass das Anwendungsverhältnis »kein einseitiges« ist: »Nicht nur Mathematik wird auf Wissenschaft, sondern Wissenschaft wird auch auf Mathematik angewandt« (S. 391). Fand über Jahrhunderte hinweg eine wechselseitige Befruchtung vor allem zwischen Physik und Mathematik statt, so dass mathematische Annahmen (z.B. Linearität) mit physikalischen Heuristiken (z.B. Homogenität) auf natürliche Weise einherzugehen schienen, so könnte man angesichts der in jüngster Zeit oft diagnostizierten Ablösung der Physik als Leitwissenschaft durch die Lebenswissenschaften spekulieren, dass zukünftige Impulse für

11 Zu explorativen Erkenntnisstrategien in der Wissenschaft vgl. u.a. Friedrich Steinle, Grant Fisher und Axel Gelfert (Hg.): *Exploratory Models and Exploratory Modeling in Science* (=Bd. 29, Heft 4 von *Perspectives on Science*), Cambridge, MA. 2021.

die Mathematikentwicklung womöglich aus den mit der biologischen Prozesslogik verbundenen Herausforderungen hervorgehen werden. Jedoch: »Wie ein ›biologischer Calculus‹ aussehen könnte, darüber kann nur spekuliert werden« (S. 395).

Der Terminus ›operative Epistemologie‹ war, im Deutschen wie im Englischen, bisher philosophisch komplett unbesetzt. Einzig bei Niklas Luhmann findet sich eine – von einigen Kommentatoren als ironisch gedeutete – Erwähnung, wenn er sich in seiner *Kunst der Gesellschaft* darüber mokiert, wer von der Fiktion eines extramundanen Subjekts ausgehend philosophiere, der denke »im langen Schatten der Theologie«; dagegen lehre »die heute weitgehend akzeptierte [*sic!*] operative Epistemologie«, alles Beobachten müsse »sich also auf einen blinden Fleck einlassen, dank dessen es etwas (aber nicht alles sehen kann)«: »Die Unbeobachtbarkeit der Operation des Beobachtens ist die transzendente Bedingung seiner Möglichkeit«. ¹² Nun mag sich das Beobachten selbst seiner eigenen Beobachtung *als Operation* entziehen oder nicht; wie Gramelsberger – die sich aus guten Gründen nicht auf Luhmanns beiläufige Erwähnung stützt – jedoch mit ihrem Band eindrucksvoll belegt, lässt sich viel über das Wechselverhältnis von Mathematik, Philosophie und empirischer Welt lernen, wenn man jene Operationen, die tatsächlich beobachtbar sind, in ihrer Anwendung auf konkrete Problemstellungen einer genauen Beobachtung und Analyse unterzieht. Nicht die thesenhafte Setzung einer neuen Art von Erkenntnistheorie ist das Anliegen von *Operative Epistemologie*, sondern der Nachweis – durch Engführung von philosophischen Grundlagendiskussionen, historischen Problemtrajektorien und einer an Fallbeispielen geschulten Aufmerksamkeit für die Realität der Wissenschaftspraxis – dass sich die wahre Formkraft der Mathematik daran beweist, wie sie durch Flexibilität und eigene Dynamik immer wieder aufs Neue zur problemadäquaten (Re-)organisation unserer wissenschaftlichen Anschauung und Erfahrung beigetragen hat.

12 Niklas Luhmann: *Die Kunst der Gesellschaft*, Frankfurt am Main 1995, S. 95–96.