

1944--2024, Würdigung und Rückblick. Ein *Essai* über 80 Jahre mathematische Modellierung von Geosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre

Bernhelm Booß-Bavnbek, unterstützt von Jens Høyrup, beide Universität Roskilde, Dänemark

Zusammenfassung. Ich erinnere an drei blutige Liebesgeschichten zwischen Mathematik und Krieg, die am Ende des Zweiten Weltkriegs heranreiften und ihre Anwendbarkeit erreichten: die Triade aus *Kernenergie*, *Düsenantrieb* und *Digitalisierung*. Vor dem Hintergrund früherer Erfahrungen und Methoden und dem Fehlen von entscheidender Bedeutung früherer Anwendungen mathematischer Konzepte in anderen Bereichen versuche ich, die technische Neuartigkeit dieser Triade mathematikbasierter Technologien zu charakterisieren; die Spuren ihrer kriegerischen Ursprünge aufzuzeigen und ihren prägenden Einfluss auf die spätere Entwicklung von Mathematik, Wissenschaften, Technologie, Gesellschaft und die öffentliche Wahrnehmung.

Vorwort. Hallo Leute: Companieros und companieras! Muchachos und muchachas! Liebe Christa, liebe Kollegen und Freunde! Bitte verzeiht mir, wenn ich euer gemütliches und nettes Beisammensein störe. Ich bin kein Mathehistoriker. Aber ich freue mich immer, mit euch zusammen zu sein. Es wärmt mein altes Herz, besser als Whisky, euren immer neuen Entdeckungen auf dem mühsamen Weg der Mathematikgeschichte und über den Sinn und die Bedeutung von all dem zuzuhören.

Wo ich herkomme, in der Gegend da oben, ist es ziemlich kalt und ungemütlich: Ich bin einer der letzten Mohikaner, der fast ausgestorbenen Ethnie der Mathematiker, die in der reinen Mathematik tätig sind und über umfangreiche Berufserfahrung in der Anwendung mathematischer Konzepte und Methoden in der realen Welt verfügen. Wir waren zu unserer Absonderung gezwungen, weil wir die *Selbstgefälligkeit der reinen Mathematiker* nicht ertragen konnten, d. h. die Dekonstruktion der Mathematik durch marginale Verallgemeinerungen und im besten Fall Versprechungen über die *ultimative* menschliche Anwendbarkeit unserer Ergebnisse. Um es mit den Worten von D. MUMFORD zu sagen: "The thing that leaps to mind is something about the suicidal tendency in math to get more and more technical and never to think about explaining one's ideas to mathematicians in other fields of math (let alone other scientists or even the general public). The field has a strange psychology linked to the fear of being thought dumb if you don't know everything." Und N. WIENER: "There has been a tendency, visible here and there, to give up the search for a great stroke or a great aperçu and to be content with a sort of mathematical embroidery... This reinforces the tendency toward the thin and the bodiless change, which is one of the besetting sins of the pure mathematics of the present time and often burgeons into mountains of triteness and bad taste." Nicht besser ist die doppelte Selbstgefälligkeit der mit Anwendungen befassten Mathematiker, die nur die *unmittelbaren* positiven Früchte ihrer Arbeit sehen und die Schattenseiten auf lange Sicht tabuisieren.

Wir, die letzten Mohikaner, haben leider die Nestwärme verloren, den Komfort der gegenseitigen Anerkennung, des Schulterklopfens und der Zugehörigkeit zu einem Mainstream. Auf harte Weise lernten wir den Unterschied zwischen der Glaubwürdigkeit der Mathematik und der Mathematiker, d. h. zwischen der ewigen Wahrheit der mathematischen Argumente und der ständigen Verbreitung von Lügen, Illusionen und Verkaufsparolen unter Mathematikern über ihr Fach.

Das mag für einige von Ihnen traurig klingen. Aber glauben Sie mir, im Reservat ist es gar nicht so schlimm. Wir haben den Whisky, die meisten von uns haben eine ordentliche Pension, und jeden Abend haben wir das Lagerfeuer, um neuen Unrat zu verbrennen, um von

alten blutigen Zeiten zu sprechen, von unseren Triumphen, vom miserablen Zustand der Welt und von den verstorbenen Freunden, wie

1. Meine Ehefrau in vierzig Jahren, die Militärgeschichtlerin SUSSI BOOSS-BAVNBK (1949-2020). Sie begleitete mich zu unserem Treffen 2014. Sie fragte mich immer wieder nach dem Leben in einer mathematisierten Welt, und sie küsste mich und liebte mich für die Ehrlichkeit meiner immer gleichen Antwort "Viel Dunkelheit und viel Licht!"
2. Unser Sohn, der mathematische Geograph und Softwareentwickler DANIEL HOLMBOE BANG (1972-2020), der von allen, die ihn kannten, für sein zuversichtliches Lachen, gepaart mit seiner ernsten Nüchternheit, geliebt wurde, z. B. wenn er mit immer neuen Ideen zu den glänzenden Fortschritten der geographischen Modellierung in der versicherungsmathematischen Praxis beitrug und gleichzeitig auch auf die empörende Seite der *Profilierung* wirklich eines jeden aufmerksam war.
3. Mein jahrzehntelanger Mentor, der Universalgelehrte, Mathematiker und Wissenschaftsautor PHILIP J. DAVIS (1923-2018), war ein häufiger Teilnehmer dieser *Austrian Math History Series*. Er sagte mir: "Du wirst dort eine ganz besondere, sympathische und produktive Verästelung von Menschen finden. Im Gegensatz zum üblichen Reklamestil bei anderen Fachtagungen bemühen sich die Referenten in den Vorträgen, Bescheidenheit bei ihren Behauptungen zu üben. Im Gegensatz zu dem eiligen und manchmal etwas seichten Plausch in den Tagungspausen andernorts werden bei CHRISTA BINDER die Pausen großzügig über den Tag verteilt, und der Geist der Tagung, die gemütlichen Spaziergänge in der Umgebung und die Aufgeschlossenheit der Teilnehmer fördern anspruchsvolle Gespräche über den Sinn unserer Arbeit und über unsere Lebensziele, immerhin die beiden zentralen Fragen eines Lebens als Mathematiker."
4. Jahrelang, und noch mehr nach unserem Treffen 2014, als ich ihm zum letzten Mal zuhörte, wurde IVOR GRATTAN-GUINNESS (1941-2014) zu einem Vorbild für eine facettenreiche Sicht auf den Kampf und den Schmerz mit den Feinheiten der Welt und der Mathematik, wie sie IVOR z. B. auch von J.-L. LAGRANGE, einem der brilliantesten, genialsten und selbstkritischsten Mathematiker der Geschichte, erfahren hatte.

Ich widme meinen Bericht¹ dem Andenken an diese vier wunderbaren Menschen.

1. Eine Bilanz der WW2-Triade

1.1 Kernenergie - mehr als TNT. Die spektakulärste Errungenschaft des Zweiten Weltkriegs war die Entdeckung einer neuen Art von technologisch verfügbarer Energie, der Kernenergie, die in Bezug auf Energie/Gewicht millionenfach stärker ist als Zucker, Fett und TNT, zunächst durch *Kernspaltung* von Uran-235 oder Plutonium-239, was durch transportable Spaltbomben demonstriert wurde, die die japanischen Großstädte Hiroshima und Nagasaki mit jeweils nur einer einzigen Explosion zerstörten. Nach den Kriegsjahren wurden diese Massenvernichtungswaffen durch ebenfalls transportable und tausendmal stärkere Wasserstoffbomben ergänzt, die auf Fusionsreaktionen zwischen Wasserstoffisotopen (Deuterium und Tritium) basieren. Für die Spaltbombe erlangte deren moderierte und verlangsamte, meist nicht explosive Variante zur Stromerzeugung weltweite Verbreitung.

¹ Gemeinsam mit JENS HØYRUP wurde dieser Vortrag als Eröffnungsvortrag für die **16. Östr. Symposion zur Geschichte der Mathematik**, Mönichkirchen, 27.-31. Mai 2024 geplant, aber wegen eines Verkehrsunfalls abgesagt.

Die Auswirkungen der Atom- und Wasserstoffbombe auf die Sozialwissenschaften und die Kommunikation waren enorm und lassen sich am besten durch den Mangel an Ernsthaftigkeit und Ehrlichkeit charakterisieren, den M. MACLUHAN 1964 mit dem Satz "The medium is the message" ironisierte. Am bemerkenswertesten war die trügerische Verpackung, wie H. TRUMANS *Killing to save lives!* (seine Begründung für den Abwurf der beiden Bomben war nicht ehrlich, also die verbündete UdSSR einzuschüchtern, sondern angeblich den Zweiten Weltkrieg im Osten zu beenden, was später von den Kriegshistorikern zurückgewiesen wurde), die irrsinnigen Versprechungen militärischer Überlegenheit durch technologische Überlegenheit und die spekulativen Konzepte des *nuklearen Regenschirms* und der *gegenseitig zugesicherten Zerstörung - MAD*. N. BOHR'S *Atoms for peace!* klingt sympathischer. Doch auch sein Versprechen einer praktisch unendlichen, billigen und sauberen Energieerzeugung erscheint angesichts des dauerhaften radioaktiven Mülls und anderer Risiken für die Zivilbevölkerung irrsinnig.

Zugegeben, es gibt ein paar *mathematische Triumphe* zu feiern: Erstens: Die Atomphysik wurde zum Laufen gebracht. Es war ein langer Weg vom intuitiven Konzept einer neutroneninduzierten Kettenreaktion von L. SZILARD im Jahr 1933 bis zu R. PEIERLS' und O.R. FRISCH'S recht präziser Schätzung der kritischen Masse von Uran-235 im Jahr 1939, um die Kettenreaktion mit exponentiell wachsender Überschussenergie aufrechtzuerhalten, die glücklicherweise von W. HEISENBERG, der für Nazi-Deutschland arbeitete, nicht gemeistert wurde. Es gab weitere mathematische Herausforderungen, die für das Implosionsmodell der Atombombe angegangen und gelöst wurden. Im Gegensatz zu HEISENBERG'S arrogantern und eng an der Physik orientiertem Denken waren die wichtigsten Herausforderungen für den Bau der Spaltbombe jedoch technologischer Natur, nämlich die Produktion ausreichend großer Mengen von U-235 durch große Zentrifugenreihen und von Pu-239 durch schnell gebaute Kernkraftwerke.

Einen nachhaltigen Einfluss auf die Mathematik hatte S. ULAM'S und J. VON NEUMANN'S geniale Monte-Carlo-Stoßwellensimulation für die Wasserstoffbombe, die den numerischen Vorteil eines stochastischen Ansatzes für riesige deterministische Systeme zeigte. Ähnliche Überlegungen wurden von A.N. KOLMOGOROW entwickelt. Indirekt haben die Atombomben zu Durchbrüchen in der *Atmosphärenphysik* und der *Erdwellenakustik* für ein kontrolliertes Testverbot sowie in der *Radiologie* und *Genetik* durch die reichhaltigen medizinischen Proben aus Japan und anderen Ländern geführt.

Über die mathematischen und physikalischen Fortschritte bei der Prüfung von Kerngeräten im Labor und durch numerische Simulation ist nur wenig bekannt. Ich gehe aber davon aus, dass manche Fortschritte in der Metrologie und der chemischen Reinigung von Grundstoffen von Erfahrungen in der Kerntechnik gestützt wurden. Auch können wir Laser, LED und NR/MRI als (späte) Ableger des Zweiten Weltkriegs betrachten. Im Dezember 2022 gab das *Lawrence Livermore Laboratory* der US-Energiekommission z.B. bekannt, dass es die Plasmaeindämmung für eine kleine Probe mit Hilfe der Lasertechnologie, ähnlich wie bei Laboratorium-Tests alter und neuer Wasserstoffbomben, erreicht hat. Der Plasmaeinschluss ist für die Realisierung eines gebremsten Fusionsreaktors von entscheidender Bedeutung, so dass das LLL tatsächlich eine Alternative zu den üblichen

Arbeiten (mit einem magnetischen Tokamak-Einschluss, so auch im europäischen ITER) entwickelt hatte.

Gerüchten zufolge handelt es sich bei der *EUV-Lithografie (Extreme UltraViolet Lithography)*, die von einer Kernphysikgruppe bei Phillips entwickelt und von dem niederländischen multinationalen Unternehmen *ASML (Advanced Semiconductor Materials Lithography)* für Fotolithografie-Maschinen eingesetzt wird, die für die Herstellung der modernsten Chips benötigt werden, um einen späten Spin-off der Atombombe.

Der wunderbare Verstand von J. NASH und anderen Spieltheoretikern schockierte Nuklearstrategen auf der ganzen Welt, indem sie das *Gefangenendilemma* entwarfen, ein verhaltensorientiertes Nicht-Nullsummenspiel, das durch logisch-formale Argumentation und in experimentellen Verhaltenstests zeigte, dass das Funktionieren von MAD davon abhängt, dass der menschliche Verstand von der formalen Logik abweicht, wenn ein Kommandeur in tiefer Verzweiflung einen Vergeltungsschlag vorzieht, selbst wenn das materielle Ergebnis vorhersehbar weniger günstig ist als sich zu ergeben.

Zusammenfassend muss ich zugeben, dass sich die wissenschaftlichen Auswirkungen der Atombomben und die mathematischen Nebeneffekte größtenteils auf die Bereiche der Strahlen- und Kernphysik beschränken. Der Transfer in andere Bereiche war gering, vielleicht abgesehen von den folgenden allgemeineren Auswirkungen auf die Wissenschaftsorganisation, die Finanzierung und die öffentliche Wahrnehmung:

(1) Die säkulare Erfindung der *Big Science* im Rahmen des Manhattan-Projekts hat sich als erfolgreiches operationelles Schema erwiesen und wird nun auch in anderen Bereichen der Physik und in vielen anderen Bereichen wie den Computerwissenschaften, der Medizin und der Biologie angewendet. Das enorme Ausmaß führte zu einem neuen Holismus, nämlich der gleichzeitigen Betrachtung einer Vielzahl von Prozessen. Daraus entwickelte sich ein *neues Modellierungsparadigma*, das im Gegensatz zum alten Modellierungsideal der Vereinfachung, Abstraktion und Idealisierung steht. Offensichtlich ist dieses neue Paradigma zweideutig und führt teils zu spekulativer Barbarei, teils zu neuen Welten der Entdeckung. (2) Die Atombombe mit ihren politischen Verästelungen war das erste Beispiel für eine unverhohlene *Politisierung der Wissenschaften* und für die duale *Verwissenschaftlichung der Politik*. Es überrascht nicht, dass mit diesen beiden Prozessen eine Inflation von schlaun *Lügen*, die Anbetung der von den Medien auserwählten *Experten*, unbegründete *Versprechungen*, irrationale *Skepsis*, die *Missachtung der Folgen* und ein verkümmertes und oft ganz elitäres *Verantwortungsgefühl* verbunden waren [Fälle z.B. Covid-19, Fischereiquoten, Schätzungen von landwirtschaftlich bedingten Umweltrisiken]. (3) Am ausgeprägtesten für die Mathematik ist die neue Züchtung von *AMiNOs - Applied Mathematicians in Name Only* -, d.h. Mathematiker, die bei der Einwerbung von Forschungsmitteln wohlklingende Namen fallen lassen von oberflächlich verwandten wissenschaftlichen oder gesellschaftlichen Problemen, ohne Substanz oder nachweislich erfolgreiche Anwendungen der eigenen rein mathematischen Errungenschaften in der realen Welt.

1.2 Strahlantrieb - jenseits des Rades. Während der Versailler Vertrag die deutsche Flugzeugforschung und -produktion verboten hatte, wurde die Raketentechnik im Vertrag nicht erwähnt. Infolgedessen erlangte die deutsche Wissenschaft und Industrie einen

Vorsprung auf diesem Gebiet, der im Zweiten Weltkrieg mit der Einführung des Messerschmitt Me 262-Turbinenjagdflugzeugs, eines *raketengetriebenen Überschallpfeiflugzeugs* und der *ballistischen V2-Rakete* auf dem Schlachtfeld seinen Höhepunkt fand. Seit den Arbeiten von K. ZIOLKOWSKI zu Beginn des 20th Jahrhunderts war die Raketentechnik theoretisch gut verstanden. Das Neue an der Me 262 war die kontinuierliche Steuerung des Antriebs, die hohe erreichbare Geschwindigkeit und die Einfachheit des robusten Strahlantriebs im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor als Antrieb. Die Me 262 hatte jedoch keinen Einfluss auf den Ausgang des Zweiten Weltkriegs, da sie zu spät und in zu geringer Zahl auf den Markt kam und die immense Überlegenheit der alliierten Streitkräfte am Boden nie ausgleichen konnte. Was den *Blitz auf London* betrifft, *so* hatten weder die deutschen V1-Marschflugkörper noch die ballistischen V2-Raketen eine nennenswerte militärische Bedeutung für den Zweiten Weltkrieg.

Dennoch hatten Raketen- und Düsenantriebe einen viel größeren Einfluss auf Wissenschaft, Technik, Militär, Politik und ziviles Leben *in der Nachkriegszeit* als die Entwicklung der Kernenergie (die in unserem Abschnitt 1.1 behandelt wird): (1) Es wurde ein rücksichtsloser, billiger *Langstrecken-Massentourismus* ermöglicht, einer der Hauptverursacher des beschleunigten Klimawandels; (2) jahrzehntelang hielt die sowjetische Überlegenheit bei Interkontinentalraketen ein *nukleares Gleichgewicht* mit der US-amerikanischen Überlegenheit bei strategischen Bombenflugzeugen; (3) die *numerische Strömungsdynamik* machte die Strömungsdynamik über die klassische Hydrodynamik hinaus funktionsfähig, d.h. auch für Gase, für Verbrennungsprozesse und für dünne Schichten, wie z.B. in J.D. Buckmasters und G.S.S. Ludfords klassischer *Theory of Laminar Flows*, Cambridge University Press 1982; (4) die zugrundeliegenden mathematischen Fortschritte fanden schnell breite Anwendung in weichen Materialien, numerischer Wettervorhersage, Modellierung des Klimawandels, optimalem Design von Windturbinen, Autodesign, Herz-Kreislauf-Modellierung, Wirtschaft, Finanzen; (5) die damit einhergehende riesige Soft- und Hardware-Nachfrage konnte langsam, aber effektiv befriedigt werden (wenn auch, wie man sagt, mit nicht enden wollenden Überraschungen, z.B., mit dem (i) magischen Realismus von Schlangen, die in numerischen Simulationen der Bernoulli-Gleichungen auftreten, die mathematisch gesehen reine laminare Strömungen ergeben - aufgrund *virtueller, numerisch erzeugter Reibung*, (ii) mit Überraschungen bei jeder Implementierung derselben Software auf einer neuen Plattform und (iii) mit jeder neuen Simulation und jedem neuen Tunneltest, z. B. von Schiffsmotoren oder Offshore-Windenergieanlagen); (6) fehlender Nachweis der Existenz, Einzigartigkeit und Regelmäßigkeit der Lösungen aller Navier-Stokes-Gleichungen (eines der sieben Millenium-Preis-Probleme des *Clay Mathematics Institute*); (7) Versagen der Navier-Stokes-Gleichung für die Nanohydrologie, wie von J. SCHMIDT HANSEN in seiner Monographie *Nanoscale Hydrodynamics of Simple Systems*, CUP 2022, gezeigt; (8) Dichotomie von Determinismus und Stochastik (siehe oben).

Zusammenfassend kann ich sagen, dass ich aus ökologischer Sicht die *negative Bewertung* des technologischen Fortschritts teile, der durch die bahnbrechenden Fortschritte in der Strömungsdynamik des Zweiten Weltkriegs ausgelöst wurde, und zwar sowohl im Hinblick auf die Beschleunigung des Klimawandels als auch auf den fortschreitenden Verlust der biologischen Vielfalt durch den billigen Massentourismus und die nicht nachhaltige Ausbreitung von Tourismus- und Sportgebieten in den wertvollsten Teilen der Ökologie der Erde - die alle auf dem Düsenantrieb beruhen, aufrechterhalten und beschleunigt werden.

Positiv zu vermerken ist, dass einige der mathematischen Entwicklungen zum Verständnis von Veränderungen und Gleichgewichten in komplexen Systemen seit dem Jahr 262 eng mit der militärischen Forschung im Bereich der Gasdynamik verbunden sind und seitdem ein enormes Potenzial zur Entdeckung neuer Aspekte der Ökologie und des Lebens

aufweisen, vergleichbar nur mit den faszinierenden Verheißungen der geheimnisvollen 2/3 des Lebens auf dem Planeten Erde in der Tiefe der Ozeane oder den Verheißungen des unbekanntes Lebens auf den Milliarden von Milliarden anderer möglicherweise bewohnbarer Exoplaneten im Universum (wo nach neuen fluiddynamischen Berechnungen der Entstehung von Planeten im Frühstadium eines Sterns gute Chancen bestehen, dass Wasser auf dem Planeten bleiben kann). In der Mathematik bezeichnen wir die neuen Möglichkeiten der mathematischen Modellierung und der numerischen Simulation mit dem Begriff *mechanische Modellierung*, d.h. mathematische Modelle, bei denen die Form der Gleichungen und die Koeffizienten eine breitere Bedeutung haben sollen und - im Prinzip - mit Werten, die in Experimenten überprüfbar sind, im Gegensatz zu den traditionellen Formen der mathematischen Modellierung, bei denen eine korrekte Wiedergabe von Daten das wichtigste, rein phänomenologische Qualitätskriterium war.

1.3 Digitalisierung - lässt Menschen arbeiten. Nach den grundlegenden Forschungen zur Vorgeschichte der Zahlensysteme von P. DAMEROW und R.K. ENGLUND, *Die Zahlzeichensysteme der Archaischen Texte aus Uruk*, Berlin 1985, gibt es seit 5000 Jahren Formen der Digitalisierung zur Bewältigung des Arbeitsaufkommens im Bauwesen, der Warenmenge im Handel, der Arbeitskraft im Krieg und der himmlischen und göttlichen Beobachtungen. Seitdem hat sie sich im Laufe der Jahrhunderte und Jahrtausende zu immer neuen Höhenflügen entwickelt, numerische Beschreibung von Farben, Tonhöhen, Lautstärken, Konzentrationen. Die Neuigkeit von Turings Team im Hauptquartier der britischen *Code and Cypher School* in Bletchley Park zu Kriegszeiten war, dass ihre digitalen Computer *Colossi* die Entschlüsselung der deutschen *Enigma*, die deutsche Logiker zuvor für unknackbar gehalten hatten, effizient meisterten. Wie bei der Atombombe und dem Düsenantrieb muss ich hinzufügen, dass auch die dritte Säule der auf Mathematik basierenden Triade des Zweiten Weltkriegs, die Digitalisierung mit den damit verbundenen neuen Computermethoden, keinen Einfluss auf den Ausgang des Zweiten Weltkriegs hatte: Sie hätte das Leben von Tausenden und Abertausenden von Matrosen und Soldaten durch die Umleitung von Konvois retten können, aber das hätte gezeigt, dass die Enigma geknackt war.

Aus epidemiologischer Sicht qualifiziert die schnelle, weite und effiziente Verbreitung der Digitalisierung diese als die ansteckendste mathematische Errungenschaft des Zweiten Weltkriegs. Ich erkläre die Ansteckungskraft der Digitalisierung durch ihre Voraussetzungslosigkeit im Gegensatz zur Kontext-Einbettung der klassischen mathematischen Modellierung. Ob wir uns mit Dekodierung (A. TURING 1942) oder Public-Key-Kryptographie (R.L. RIVEST, A. SHAMIR und L.M. ADLEMAN 1977), fehlerkorrigierenden Codes (R. HAMMING 1947) oder Kompression (D.A. HUFFMAN 1952, A. LEMPEL, J. ZIV 1978), Suche (H.P. LUHN 1953) oder Sortieren (T. HOARE 1959), Beschreiben (D. E. KNUTH 1978) oder Erkennen von Mustern (D. MUMFORD 2002), Simulieren der ritualisierten Kommunikation einer britischen Lordschaft oder eines amerikanischen Psychotherapeuten (J. WEIZENBAUM 1966) oder eines Schachspielers (C. SHANNON 1949), das Entwerfen der Architektur eines Computers (J. v. NEUMANN 1945) oder einer Programmiersprache (J. BACKUS und P. NAUR 1960), das Analysieren (A.A. MARKOV 1833) oder Vorhersagen (N. WIENER 1942) von Zeitreihen in Natur, Sprache und Wirtschaft, in den meisten Fällen geht aus der Aufgabenstellung hervor, welche Entitäten in Ziffern zu kodieren sind, und der Einfallsreichtum besteht meist darin, clevere Wege für die Kodierung und den Umgang mit den Codes zu finden.

In meiner *Ruhmeshalle* nehmen diese Mathematiker privilegierte Plätze ein, da sie mit ihrem Beitrag zur Digitalisierung und zu Computermethoden den größten Einfluss auf das Leben in unserer Zeit hatten - bei der Lenkung der Aufmerksamkeit auf eine reiche Vielfalt von Gesichtspunkten, bei der Automatisierung ermüdender und sich wiederholender Arbeit,

beim ungehinderten Bankverkehr, bei der freien Verbreitung von Wissen, bei der Einsicht in technische Details und bei der sonstigen Bildung, bei der sorgenfreien Unterhaltung, beim breiten Zugang zu Fremdsprachen und beim sinnvollen Reisen, bei der Genidentifizierung, bei der allgemein zugänglichen öffentlichen Gesundheit, bei der fortgeschrittenen wissenschaftlichen Forschung, bei der scheinbar grenzenlosen sozialen Kommunikation, bei der Spline-Approximation und bei der praktischen Telekommunikation. Dies sind, in alphabetischer Reihenfolge, die Bereiche, in denen ich die größten positiven Auswirkungen der Digitalisierung auf unsere Gesellschaft festgestellt habe und die unser Leben lohnender machen. Nun komme ich zu den Schattenseiten.

(1) Die meisten Digitalisierungsvorgänge gehen mit einer scharfen Trennung zwischen dem Nutzer und dem Anbieter einer Anwendung einher. Um Geld von meinem Konto bei Bank A auf das Konto meines Klempners bei Bank B zu überweisen, was in etwa die Anwendung eines öffentlichen RSA-Schlüssels beschreibt, fordere ich von meiner Bank eine große ganze Zahl an, die das Produkt aus zwei Primzahlen ist, die auch für mich geheim gehalten werden. Dann benutze ich die Ziffern des Produkts, um meinen Bankauftrag zu kodieren, und vorerst kennt nur meine Bank die beiden Primzahlen und kann sie zur Entschlüsselung meiner Nachricht verwenden. In diesem Prozess sind die angewandten Datenformate und die Einzelheiten der verschiedenen Arten ihrer Verarbeitung in einer Blackbox eingeschlossen, deren Inhalt nur dem Anbieter der Dienstleistung bekannt und für den Nutzer verborgen ist. Zu zitieren ist B. LATOUR 1999, *Pandora's hope: essays on the reality of science studies*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press. S. 304, *Blackboxing* ist "die Art und Weise, wie wissenschaftliche und technische Arbeit durch ihren eigenen Erfolg unsichtbar gemacht wird. Wenn eine Maschine effizient läuft, wenn ein Sachverhalt geklärt ist, braucht man sich nur auf ihre Inputs und Outputs zu konzentrieren und nicht auf ihre interne Komplexität. Je erfolgreicher Wissenschaft und Technik sind, desto undurchsichtiger und undurchschaubarer werden sie paradoxerweise. Persönlich halte ich das Blackboxing in vielen Computermethoden für einen benutzerfreundlichen Vorteil und nicht für ein deutliches Minus. Zum Teil ist sie demokratisch und befreit uns Nutzer von lästiger und anspruchsvoller Arbeit, zum Teil ist sie aber auch autokratisch, bevormundend, vergrößert die Ungleichheit in der Gesellschaft, erleichtert die Überwachung von Menschen und macht die Kontrolle und Unterbindung unrechtmäßiger Überwachung fast unmöglich.

(2) Sorge bereitet mir der durch Digitalisierung und Automatisierung induzierte *Verlust von Einsichten und Kompetenzen*, wenn z.B. der einfache Zugriff und die Manipulation riesiger Datenspeicher die Ad-hoc-Modellierung unterstützen, und die damit einhergehende Formatierung von Verhalten, d.h. wenn plausibler Output ein Modell vertrauenswürdig macht, auch wenn Gleichungen und Koeffizienten verborgen oder unerklärt bleiben, im Gegensatz zu den oben in Abschnitt 1.2 erwähnten Mechanismen, der theoriegestützten Modellierung.

(3) Ein weiterer negativer Aspekt der Digitalisierung und effektiver Computermethoden ist, dass sie, wie die alten Kirchturmuhren und Fabrikpfeifensignale, jetzt nur noch viel tyrannischer und effektiver, *den Menschen und die Gesellschaft dazu bringen, sich einem Computer und seiner Software anzupassen*, anstatt Computer und Software bereitzustellen, die zum Menschen passen. Hier zeigt sich die militärische Provenienz der Digitalisierung am deutlichsten disziplinierend, auch wenn Geschwindigkeit und Macht der Digitalisierung *nach dem* Ende des Zweiten Weltkriegs ein überwiegend ziviles Phänomen waren.

(4) Der *MIMAC - The Military Industrial Media Academic Complex* (in der Schreibweise von J. ØBERG) behauptet, dass KI und die Digitalisierung eine säkulare und, so ihre Behauptung, gutartige Störung unserer Kapazitäten zur Entwicklung der industriellen und landwirtschaftlichen Produktion, der Verwaltung der Gesellschaft, der sozialen Organisation

des Bildungswesens, der wissenschaftlichen Forschung und des Gesundheitswesens und, nicht zu vergessen, des Militärs und der Unterhaltung bewirken: *Mickey fliegt den Stealth* (P.J. DAVIS' Sarkasmus 2003)! Wie von Zauberhand ist die traditionelle und vernünftige Neugier auf die zugrundeliegenden Annahmen, die verwendeten Methoden und die Glaubwürdigkeit von Modellen, Berechnungen und angeblich deraus folgenden notwendigen Anforderungen verschwunden und durch Bewunderung, ja fast Anbetung der beeindruckenden Leistungen (und Ignorierung der teils gespenstischen, teils recht amüsanten Fehlleistungen) von Fahrzeug-Autopiloten und großen Sprachmodellen wie ChatGPT und Microsoft Copilot ersetzt worden. Vor einiger Zeit besuchte ich die Mathematik-Taskforce in der Wissenschaftsabteilung eines großen Chemiekonzerns. Nachdem ich einige der Reaktoren besichtigt hatte, hatte ich viele Fragen an die Kollegen. Hier sind zwei: (A) Ich war überrascht, dass Steuerung und Kontrolle nicht vollständig automatisiert waren. (B) Ermöglicht die Anwendung fortschrittlicher mathematischer und rechnerischer Methoden die Einführung von Prozessen, die näher an kritischen Werten, z. B. für Druck und Temperatur, arbeiten? Auf (A) war die Antwort zögernd: "Ja, Sie haben Recht. Wir könnten auf die optische Überwachung und manuelle Kontrolle verzichten. Aber wir müssen eine Notbesetzung in der Nähe des Prozesses haben, damit sie da sind und eingreifen können, wenn etwas Unvorhergesehenes passiert. Wir müssen sie auf Trab halten - und qualifiziert. Wir haben die Qualität ihrer manuellen Steuerung überprüft: als wir ein Optimum berechnet haben, waren sie schon sehr nah dran!" Auf (B) kam die Antwort sofort: "Ja, die ständigen Veränderungen der Nachfrage auf dem Weltmarkt erfordern Veränderungen bei der Nutzung der bestehenden Reaktoren. Hier sind wir Mathematiker gefragt, neue Verfahren vorzuschlagen - und hier liegt unsere größte Frustration: Immer wieder scheitern unsere mathematisch und wirtschaftlich gut ausgearbeiteten Vorschläge an den Sicherheitsüberlegungen des Vorstandes. Wir befinden uns in der Nähe einer Millionenstadt, und der Verwaltungsrat will den Ruf unseres Unternehmens auf keinen Fall gefährden, d.h. anspruchsvolle und damit riskante Verfahren sind nicht erlaubt.

Ich bewundere die Ernsthaftigkeit der Überlegungen der Kollegen, im Gegensatz zu der mangelnden Ernsthaftigkeit und dem oberflächlichen und verachtenswerten anhaltenden KI-Hype in der Politik, an den Universitäten und in den Medien. Ein ähnlicher Mangel an Ernsthaftigkeit und ein entsprechender Wille zur Selbstausschöpfung wurde von H. KISSINGER in einer gemeinsamen Arbeit mit E. SCHMIDT und D. HUTTENLOCHER bezüglich der laufenden Implementierung von KI-Systemen zur schnellen Aktivierung von Atombomben in ihrem Buch *The Age of AI: And Our Human Future*, 2021, Little, Brown and Company festgestellt.

2. Metaphysische Übertreibungen über Mathematik und die reale Welt

Mathematiker und Philosophen haben sich schon immer gefragt, inwieweit abstrakte mathematische Konzepte und Methoden von konkreten Welterfahrungen inspiriert sind und umgekehrt, inwieweit sie eine inspirierende Wirkung auf unseren Umgang mit Natur und Gesellschaft haben. Ich glaube, dass wir angesichts der oben dargelegten Fakten über die Triade des Zweiten Weltkriegs vorsichtig oder zumindest wachsam gegenüber metaphysischen Übertreibungen in den oft gegebenen Antworten sein sollten.

2.1 Versprechungen vs. Fehlorientierungen des *Kriegskeynesianismus*. Aus meiner früheren Arbeit in den Bereichen Unternehmensforschung, Ökonometrie und makroökonomische Planung kenne ich vier Modelle von Impulsen für Vollbeschäftigung und rasche technologische Innovation: (1) Das *Hubschraubermodell*, das vorschlägt, den Verbrauchern Geld nach unten zu werfen und den Investoren üppige Steuersenkungen zu

gewähren. (2) Das *merkantilistische Modell*, das harte, geradezu strafende Zölle auf Importe vorschlägt. (3) Das *sozialistische Modell*, bei dem ein kleines Gremium, z. B. eine kommunistische Partei, letztlich über Prioritäten und Wege für die gesellschaftliche, regionale, technologische und wirtschaftliche Entwicklung entscheidet. (4) Der *Kriegskeynesianismus*, der eine drastisches Durchschütteln und ein schnelles Wachstum aller Produktionszweige durch autonome Investitionen vorschlägt, in seiner reinen Form, indem man die Menschen Löcher in die Erde graben lässt, und in seiner angewandten Form durch riesige Subventionen und direkte Investitionen in die Entwicklung und Produktion von Waffen. Sehen wir uns nun die vier Modelle etwas näher an, und was unser Wissen über die Triade zu einem Urteil beitragen kann:

Für mich, der ich kein US-Bürger bin, scheint es, dass dieser November 2024 das erste Mal in der Geschichte der Wirtschaft ist, dass ein Land die Wähler darüber abstimmen lässt, ob sie entweder (1), wie von Frau HARRIS in direkter Fortsetzung der Finanzpolitik von Präsident BIDEN vorgeschlagen, oder (2), wie von Herrn TRUMP vorgeschlagen, bevorzugen. Mir erscheinen sowohl (1) als auch (2) praktikabel. In Modell (1) konnte und kann eine Hyperinflation für einen riesigen Währungsmarkt wie den US-Dollar tatsächlich vermieden werden; das Modell ist eng mit der Globalisierung, den zunehmenden Importen und der Schaffung von Arbeitsplätzen in der Software-Industrie verbunden, obwohl es im Gegensatz zu Modell (2) nichts zur gewünschten Schaffung von menschenwürdigen Arbeitsplätzen, zur Reindustrialisierung und zur technologischen Innovation in den USA beiträgt. Für Modell (2) sind die USA groß genug und reich genug an unternehmungslustigen, innovativen Talenten, um nach einer Weile autark zu sein (d.h. wirtschaftlich selbstversorgend). Staat und Wirtschaft werden auf diese Weise zu riesigen gemeinsamen Vorhaben gezwungen, möglicherweise mit einem wissenschaftlichen und technologischen Innovationspotential wie es das Manhattan Projekt hatte. Allerdings auch mit den oben beschriebenen Begrenzungen, weil an Technik und Produktion gebundene Erneuerungen -- im Unterschied zu algorithmischen, rein mathematischen Erneuerungen -- grundsätzlich nicht ohne weiteres auf andere Produktionszweige ausstrahlen. Zudem müssen die Wähler von (2) mit einem erheblichen Anstieg der allgemeinen Lebenshaltungskosten, einer ökologisch heilsamen Verknappung von Rohstoffen und einer beträchtlichen Zeitverzögerung rechnen, um das erforderliche qualifizierte und disziplinierte Heer von Arbeitskräften neu zu formen und wiederzugewinnen, um Kapazitäten von der industriellen Erneuerung auf zivile Bedürfnisse umzuverteilen und um alle Einrichtungen von Grund auf neu zu errichten.

Seit 1917 ist Modell (3) das bevorzugte Modell für viele Entwicklungsländer, die damit beeindruckende Erfolge erzielt haben, z. B. die UdSSR durch den Sieg im Zweiten Weltkrieg und China mit seiner neuen Wirtschaftspolitik. Der Nachteil des Modells (3) besteht darin, dass es ein gewisses Maß an autokratischen Strukturen zu erfordern scheint, dass es stark von der Weisheit des führenden Gremiums abhängt und dass die Überwachung und Korrektur von Fehlern bei der Bewertung der Märkte mühsam und langsam sein kann, wie die chinesische Blase im Bauwesen kürzlich bewiesen hat.

Wie J.M. KEYNES richtig erkannt hat, ist nur Modell (4) frei von den meisten Schwächen der Modelle (1-3). Daher ist es nicht verwunderlich, dass die wiedergewählte Präsidentin der Europäischen Kommission, U. V.D. LEYEN, und der neue britische Premierminister K. STARMER das Modell (4) für Europa in der gegenwärtigen Wirtschaftsflaute und dem anhaltenden Rückstand bei den Spitzentechnologien zu favorisieren scheinen. Am 5. März 2024 schlug die Kommission gegen den Widerstand einzelner EU-Mitgliedsstaaten *EDIP - The European Defence Industry Programme* – vor. Das soll ein europäisches Regelwerk werden, um mit der Umsetzung konkreter Maßnahmen aus der *Europäischen Strategie für die Verteidigungsindustrie (EDIS)* zu beginnen, darunter *FAST - ein Fonds zur Beschleunigung der Transformation von Lieferketten im Verteidigungsbereich*. *FAST* ist vorerst mit 1,5 Mrd. €

ausgestattet und soll nach 2027 auf 100 Mrd. € aufgestockt werden [VDI Nachr. und Fncl. Times 05.07.2024]. Im Gegensatz zu VON DER LEYEN, die anfangs versuchte, den beabsichtigten Kriegskeynesianismus hinter einer kriegerischen Rhetorik und eher allgemeinen Behauptungen von "besseren Arbeitsplätzen" zu verbergen, war J. HEALEY, STARMERS Verteidigungsminister, unverblümt. Er kündigte an, die neue Labour-Regierung werde prüfen, wie das Verteidigungsministerium zu einem "Wirtschaftsministerium" gemacht werden könne, das Wachstum, Wohlstand und Prosperität in Großbritannien fördert. Der Verteidigungssektor werde einer der Eckpfeiler der neuen Industriestrategie der Regierung sein, versprach er und verwies auf Daten, die zeigten, dass die wirtschaftlichen Auswirkungen von Arbeitsplätzen im Verteidigungssektor "größer sind als in vielen anderen Sektoren", während der Durchschnittslohn 40 Prozent höher sei als in anderen verarbeitenden Branchen. ... "Für eine Regierung, die das Wachstum ankurbeln, die Produktivität verbessern und die Schaffung von Wohlstand verbreiten will, ist die Verteidigung also einer der Eckpfeiler einer neuen Industriestrategie." [«STARMER announced that the new Labour administration would examine how to make the Ministry of Defence an "economic department" that drives growth, wealth creation and prosperity in Britain. The defence sector will form one of the cornerstones of the government's new industrial strategy, he pledged, highlighting data showing that the wider economic impact of defence jobs "are greater than many other sectors", while the average wage was 40 per cent higher than other manufacturing industries. ... "So for a government that wants to drive growth, improve productivity, and spread wealth creation, defence is one of the cornerstones of a new industrial strategy."» Zitiert aus *Fncl. Times* 16.07.2024]

Im Gegensatz zu den europäischen Staats- und Regierungschefs äußerte der katholische republikanische Vizepräsidentenskandidat J.D. VANCE in den USA seine Abneigung gegen den Rückgriff auf den Kriegskeynesianismus für ein Land, das nicht militärisch angegriffen wird: "Die Befürworter der amerikanischen Hilfe für die Ukraine haben argumentiert, dass unser Ansatz ein Segen für unsere eigene Wirtschaft gewesen sei, da dieser Ansatz hier in den Fabriken, die Waffen herstellen, Arbeitsplätze geschaffen habe. Aber unsere nationalen Sicherheitsinteressen können - und sind oft - von unseren wirtschaftlichen Interessen getrennt. Der Gedanke, dass wir einen blutigen und grausamen Krieg verlängern sollten, weil er gut für die amerikanische Wirtschaft war, ist grotesk. Wir können und sollten unsere industrielle Basis wieder aufbauen, ohne ihre Produkte in einen ausländischen Konflikt zu verfrachten." [«Proponents of American aid to Ukraine have argued that our approach has been a boon to our own economy, creating jobs here in the factories that manufacture weapons. But our national security interests can be - and often are - separate from our economic interests. The notion that we should prolong a bloody and gruesome war because it's been good for American business is grotesque. We can and should rebuild our industrial base without shipping its products to a foreign conflict.» Zitiert aus *New York Times* 12.04.2024].

In ähnlicher Weise lehrte 72 Jahre zuvor, in der Flaute nach dem Zweiten Weltkrieg in den USA, kein Geringerer als General MacArthur die Ökonomen: "Es ist Teil des allgemeinen Musters einer fehlgeleiteten Politik, dass unser Land jetzt auf eine Rüstungswirtschaft ausgerichtet ist, die in einer künstlich herbeigeführten Psychose der Kriegshysterie gezüchtet und durch eine unaufhörliche Propaganda der Angst genährt wurde." [Diese wirtschaftliche Ausrichtung] "führt bei unseren politischen Führern zu einer fast noch größeren Angst vor dem Frieden als vor dem Krieg." [«It is part of the general pattern of misguided policy that our country is now geared to an arms economy which was bred in an artificially induced psychosis of war hysteria and nurtured upon an incessant propaganda of fear." [This economic orientation] "renders among our political leaders almost a greater fear of peace than is their fear of war.» Rede vor der Legislative von Michigan, in Lansing, Michigan,

15.05.1952, veröffentlicht in: Imperato, Edward T., *General MacArthur Speeches and Reports 1908-1964*, Nashville, Turner, 2000 (S. 206), Zitiert nach A.B. Abrams, *Immovable Object -- North Korea's 70 Years at War with American Power*, Clarity Press 2020, chapter 2, note 46.]

Was sagen uns die oben dargestellten Fakten über die nichtmilitärischen Auswirkungen der Triade des Zweiten Weltkriegs in dieser Debatte? Es ist klar, dass die Kriegsanstrengungen mit ihrer Ressourcenkonzentration, ihrem Zeitdruck zur Erreichung der gesetzten Ziele, ihrer allgemeinen Bewunderung für Maschinen und ihrer Tendenz, auf das Leben und die Zeit der Menschen keine Rücksicht zu nehmen, ausschlaggebend dafür waren, dass die Kernphysik, die Gasdynamik und die Digitalisierung zur praktischen Anwendung kamen. Es gibt jedoch einen Zeitfaktor bei der Erfindung und dem Transfer von auf Mathematik basierender Wissenschaft und Technologie in die Zivilgesellschaft. (A) Wir können es nicht wissen, aber ich vermute, dass diese bahnbrechenden Entwicklungen in Wissenschaft und Mathematik ohne Krieg viel länger gedauert hätten. Dies ist ein Argument für den Kriegskeynesianismus. (B) Auf der anderen Seite habe ich für die Triade gezeigt, dass nur rein mathematische Innovationen wie neue Computermethoden schnell in neue Anwendungsbereiche diffundieren können, während die zivile Verbreitung anderer rüstungsinduzierter technologisch-wissenschaftlich-mathematischer Fortschritte sehr lange dauern kann, wenn überhaupt. Der Grund dafür ist, dass diese Art von Innovation eng mit den besonderen Bedingungen eines spezifischen Hintergrunds verbunden ist. Es sind diese *besonderen Bedingungen*, die eine schnelle Übertragung auf ein neues Gebiet ausschließen. Es ist daher nicht nur moralisch verwerflich, sondern auch kurzsichtig, sich bei mathematischen, wissenschaftlichen und technischen Innovationen auf den Kriegskeynesianismus zu verlassen. (C) Schließlich zeigt die Triade, dass tatsächlich auch in Rüstung und Krieg große Leistungen vollbracht werden können, die weit über befohlene Taten reichen, aber kaum auf Kommando: Die neue Qualität hochtechnologischer Rüstung und Kriegsführung erfordert nämlich eine neuen Charakter der Übereinstimmung. Ohne Übereinstimmung werden bestimmt nicht alle Technologie-Transfer-Träume des Kriegskeynesianismus aufgehen. B. BRECHT hat die Renitenz bei unzureichender Übereinstimmung in seinem Svendborger Gedicht *Abbau des Schiffes Oskawa durch die Mannschaft* [Gesammelte Gedichte, Band 2, S. 670-673] eindringlich gefeiert. Siehe auch K.M. BAVNBEK & B. ROTH, *Krigens nye kvalitet – offentlighedens nye karakter*, Roskilde 1983, 126 Seiten. Wir schließen daher aus unseren Erkenntnissen über die WW2-Triade, dass HERAKLITS' *Krieg ist der Vater aller und der König aller; einige hat er zu Göttern und einige zu Menschen bestimmt, einige hat er zu Sklaven und einige zu Freien gemacht* zwar viel Richtiges und Wichtiges enthält, aber eine metaphysische Übertreibung darstellt.

2.2 Das neue Modellierungsparadigma der Vielzahl von Zeitskalen vs. Ziele der Einfachheit. Eine weitere metaphysische Übertreibung ist die vor allem unter Physikern verbreitete Behauptung, dass Einfachheit eines der Qualitätskriterien für eine gute mathematische Modellierung ist. Die Triade erzählt eine andere Geschichte: Durchbrüche bei den im 2. Weltkrieg behandelten komplexen Systemen ergaben sich nicht durch Abstraktion und Vereinfachung, sondern im Gegenteil durch die Anschaulichkeit und Transparenz der numerischen Detailmodellierung und die Einführung sinnvoller neuer Modell-Konstrukte, die zuvor nicht betrachtet wurden, aber beobachtbar oder erkenntnistheoretisch sinnvoll waren. Wie das in allen neueren Modellierungen der Geosphäre, der Biosphäre und der Anthroposphäre tatsächlich zu einer Erfolgsgeschichte wurde, ist in den jüngsten Bänden [dieser Autor et al. (eds.), *Multiplicity of Times Scales in Complex Systems I, II*, Springer 2024] dokumentiert. Siehe auch F.W. TAYLORS verwandte Unterscheidung zwischen Standardisierung und Vereinfachung der Arbeit: "*Standardisierung* bezieht sich auf den

Prozess der Festlegung von Standards für jede geschäftliche Tätigkeit. Dabei kann es sich um die Standardisierung von Verfahren, Rohstoffen, Zeit, Produkten, Maschinen, Methoden oder Arbeitsbedingungen handeln. Diese Standards sind die Maßstäbe, die bei der Produktion eingehalten werden müssen." In der wissenschaftlichen Forschung, so möchte ich hinzufügen, ist dies der schwierige und kreative Teil, nämlich Gleichungen und Koeffizienten in Bezug auf die Theorie zu wählen oder zu konstruieren. Er fährt fort: "Die *Vereinfachung* zielt darauf ab, überflüssige Sorten, Größen und Dimensionen zu eliminieren, während die Standardisierung bedeutet, neue Sorten anstelle der bestehenden zu entwickeln." [«*Standardization* refers to the process of setting standards for every business activity. It can be standardization of process, raw material, time, product, machinery, methods or working conditions. These standards are the benchmarks which must be adhered to during production." In scientific research, I may add, this is the hard and creative part, namely, to elect or construct equations and coefficients in relation to theory. He continues: "*Simplification* aims at eliminating superfluous varieties, sizes and dimensions while standardization implies devising new varieties instead of the existing ones.» in: *The Principles of Scientific Management*, Harper & Brothers 1911]. In ähnlicher Weise können sich, grob gesagt, bei der mathematischen Modellierung ohne konstruktive und kreative Standardisierung auch die raffiniertesten Vereinfachungen als irreführend erweisen.

2.3 Datengestützte vs. theoriebasierte (*Mechanismen*) Modellierung. Seit I. KANT sind wir uns in den Wissenschaften und in der geistes- und wirtschaftswissenschaftlichen Forschung bewusst, dass eine sinnvolle Sammlung von Daten eine explizite oder unbewusste Vorstellung oder Theorie von dem, was wir beobachten, voraussetzt. Folglich hat Yu. I. MANIN in seiner *Mathematik und Physik*, Birkhäuser 1981, und, unabhängig davon, J.H. JENSEN et al. in *Innermathematical vs. extramathematical obstructions to model credibility* in: X. Avula (Hrsg.), *Mathematical Modelling in Science and Technology*, Pergamon Press 1984, New York, S. 62-65, den erkenntnistheoretischen Unterschied zwischen theoriegeleiteten mathematischen Modellen (heute auch *mechanismusbasiert* genannt) und rein datengetriebenen Ad-hoc-Modellen wie dem alten *ptolemäischen Planetenmodell* (PPM) und dem heutigen *Standardmodell der Teilchenphysik* (SM) herausgearbeitet. Aus pragmatischer Sicht besteht der Hauptunterschied darin, dass die mechanismusbasierte Modellierung mehr Einblick in die zugrunde liegende Dynamik gibt als die datenbasierte Modellierung. Es wäre jedoch eine weitere metaphysische Übertreibung, der mechanismusbasierten Modellierung eine höhere *Glaubwürdigkeit* als der datenbasierten Modellierung zuzusprechen: Für nautische Zwecke war z. B. das PPM eine Zeit lang zuverlässiger als das KEPLERSCHE Modell, und die Vorhersage des HIGGS-Teilchens durch das SM wurde 2011-2013 durch den *Large Hadron Collider* bestätigt. Darüber hinaus gehören, wie oben gezeigt, die äußerst zuverlässigen und variablen Computermethoden, die ihren Ursprung in der Digitalisierung des Zweiten Weltkriegs haben, zu den Mitteln, die eine rein technische und statistische Analyse von Daten relevanter machen können als eine auf Mechanismen basierende Modellierung. Diese Einsicht überraschte N. WIENER 1942, als er anwendbare rein statistische Methoden für den Luftkampf entwickeln konnte, die allein auf schnellen Berechnungen von Autokorrelationen und ohne jeden Bezug zur Newtonschen Mechanik beruhten. Man beachte, dass in Medizin, Ökonomie, Verkehrsplanung und in anderen Bereichen die *Datenerhebung* der teuerste Teil der mathematischen Modellierung ist. Oft wird der Modellierer vor der Erhebung nicht gefragt, sondern muss sich mit den vorhandenen Daten begnügen.

2.4 Reale, natürliche und anthropogene vs. erkenntnistheoretische Konzepte? Bei mathematischen Anwendungen können wir die ultimative Wahrheit in drei verschiedenen

Richtungen finden: Empiriker in einer überzeugenden *Beschreibung*, Rationalisten in einer falsifizierbaren *Vorhersage* und "Pragmatiker", wie G. VICO, C.S. PEIRCE und ich, in der *Vorschrift* eines funktionierenden Wirkens. Für mich lag deshalb die säkulare Bedeutung der Triade in der *Vorgabe eines funktionierenden Designs*, *Verum esse ipsum factum* (etwas mehrdeutig: "Wahrheit ist das selbst Gemachte"), das von VICO geprägt wurde [*De Antiquissima Italorum Sapientia ex Linguae Originibus Eruenda Libri Tres* (On the Most Ancient Wisdom of the Italians Unearthed from the Origins of the Latin Language) 1710, Palmer, L. M., trans. Ithaca: Cornell UP, 1988]. Meine bevorzugte Lesart ist die Behauptung, dass wir nur Dinge vollständig verstehen können, die wir selbst gemacht haben. Mir scheint, dass von VICOS Ansichten nur seine Wissenschaftsskepsis Bestand hat, während seine Industriefreundlichkeit angesichts des anthropogenen, von Menschenhand geschaffenen Klimawandels und der ebenso von Menschenhand geschaffenen Atombombe mit stark verkürzter Reaktionszeit (aufgrund der fortschreitenden Stationierung amerikanischer nuklearer Trägersysteme und der russischen Entwicklung hypersonischer ballistischer Raketen) überholt ist: Ganz offensichtlich verstehen wir diese Artefakte nur unzureichend und beherrschen sie deshalb nicht.

Zurück zur Mathematik: Auch hier können wir Unterschiede im Ursprung und Charakter der verwendeten Konzepte und Methoden feststellen: Mit VICO und PEIRCE bin ich der Meinung, dass unser Hören auf den *gesunden Menschenverstand*, der in Hunderttausenden von Jahren menschlicher Entwicklung gereift ist, der wichtigste Ansatz ist. Das gilt für die Triade, aber nicht vollständig. Die grundlegenden Ideen der Atom- und Teilchenphysik, der Neutronenstrahlung sowie der Kernspaltung und -fusion waren nicht mit dem gesunden Menschenverstand zu erfassen, und es bedurfte eines kontrollierten Einsatzes des erweiterten, nicht ganz natürlichen und nicht ganz anthropomorphen Zeichensystems der Mathematik und der Physik. Das Gleiche gilt für die Virtuosität der Digitalisierung: Ohne entwickelte Gruppen- und Körpertheorie, Zahlentheorie und Wahrscheinlichkeitstheorie wären Public-Key-Kryptographie, fehlerkorrigierenden Codes, Kompression und das numerische Erkennen von Angesichten und anderen Mustern schwer vorstellbar gewesen.

In diesem Sinne markiert die Triade einen neuen Schritt in der Mathematisierung der realen Welt.

Haftungsausschluss. Es hat 250 Jahre gedauert, von den algebraischen Berechnungen von BOMBELLI über EULER, D'ALEMBERT und GAUSS bis zur komplexen Dynamik von MANDELBROT und MILNOR, um die Konzepte, Methoden und die Bedeutung der komplexen Zahlen vollständig zu verstehen. Es dauerte 70 Jahre, bis die Entdeckung der DNA in der historischen Demografie, der Kriminologie und mit den mRNA-Impfstoffen in der öffentlichen Gesundheit breite gesellschaftliche Anwendung fand. Es dauerte 20 Jahre, bis der Transistor von der esoterischen Weltraumforschung zur Allgegenwart von Mobiltelefonen gelangte. Als H. KISSINGER 1972 CHU ENLAI nach seiner Einschätzung der *Großen Französischen Revolution* fragte, soll CHU ENLAI geantwortet haben: "Ist es nicht zu früh für eine faire und umfassende Bewertung?"

In ähnlicher Weise kann man bezweifeln, ob die 80 Jahre seit dem Zweiten Weltkrieg ausreichen, um die Rolle der Triade als *Trägerin* der "tiefen" modernen mathematischen Modellierung mit ihren vielfachen Ebenen zu beweisen, wie ich behauptete? Wie weit stimmt es, dass die traditionelle professionelle Eleganz mathematischer Modellierung teilweise schon durch die rohe Gewalt von Suchmaschinen und "künstlicher *Eleganz* (KI)" ersetzt wurde? Oder sollten wir die Rolle der Triade besser und bescheidener als *Taxifahrer* wahrnehmen, d.h. als einen Akteur, der eine immense Vielfalt wertvoller früherer Errungenschaften auf eine computergestützte produktive Weise bloß zusammenbrachte? Die Zeit wird es zeigen.

Danksagung. Der größte Teil dieses Berichts wurde im Gespräch mit dem dänischen Mathematik- und Wissenschaftshistoriker JENS HØYRUP verfasst.