

Bernd Simeon

Die Macht der Computer- modelle

Quellen der Erkenntnis oder
digitale Orakel?

SACHBUCH



Springer

Die Macht der Computermodelle

Bernd Simeon

Die Macht der Computermodele

Quellen der Erkenntnis oder digitale
Orakel?



Springer

Bernd Simeon
Fachbereich Mathematik
Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau (RPTU)
Kaiserslautern, Rheinland-Pfalz, Deutschland

ISBN 978-3-662-66298-4 ISBN 978-3-662-66299-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-66299-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: iStock/Lan Zhang

Planung/Lektorat: Iris Ruhmann

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Meinen akademischen Lehrern Peter Rentrop,
Roland Bulirsch und Werner C. Rheinboldt*

Vorwort

Digitale Patienten, Szenarien zum Klimawandel, Missionen zu fernen Planeten, das Jonglieren an den Finanzmärkten, die Entwicklung nuklearer Waffensysteme – anhand vielfältiger Episoden bietet Ihnen dieses Buch Einblick in die faszinierende Welt der Computermodelle. Sie sind unsichtbar und zugleich omnipräsent. Ständig erobern sie sich neue Anwendungsfelder und verankern sich damit tief in unserer Existenz. Ihre Macht verdanken sie den immensen Kapazitäten moderner Rechnersysteme, und sie wird inzwischen zusätzlich befeuert durch das maschinelle Lernen aus riesigen Datenbergen.

Algorithmen fungieren als ausführende Organe der Computermodelle. Sie tasten die Wirklichkeit ab, erfassen die unterschiedlichsten Zusammenhänge und etablieren diese moderne Quelle des Erkenntnisgewinns in Wirtschaft, Wissenschaft und Technik. Damit geht eine unaufhaltsame Mathematisierung vieler Lebensbereiche einher, die manche Ängste schürt: Sind wir, wie Goethes Zauberlehrling, schon tief im Netz der Algorithmen und Computermodelle verstrickt und verlieren die Kontrolle über ihre Macht?

Wie ein modernes Orakel stillen die Computermodelle unsere Sehnsucht nach einer berechenbaren und kontrollierbaren Zukunft. Sie vermitteln Sicherheit. Aber es kommt vor, dass sie Sicherheit nur suggerieren und mit ihren Prognosen gravierend danebenliegen. Blindes Vertrauen beim Laien wie auch starre Modellgläubigkeit beim Experten resultieren dann in Fehlentscheidungen, dem Versagen technischer Systeme oder ökonomischem Desaster.

Seit Jahrzehnten forsche ich als angewandter Mathematiker zum Themenkreis der Computermodelle. Die Vielfalt und Komplexität der Anwendungsfelder haben in dieser Zeit enorm zugenommen. Umso mehr drängen sich mir fundamentale Fragen auf, die die Leitlinie für dieses Buch bilden. Warum ist dieser Zugang so erfolgreich? Können wir den Erkenntnissen, die er liefert, wirklich vertrauen? Wohin geht die Entwicklung – haben uns die Algorithmen schon fest im Griff?

Wissenschaft lebt von Begeisterung – und vom Zweifel. Von der Begeisterung, die Geheimnisse dieser Welt bis zum kleinsten i-Tüpfelchen zu ergründen, und vom Zweifel an längst etabliert Geglaubtem, das sich als falsch entpuppen könnte. Mit den Episoden in diesem Buch möchte ich Ihnen von der Faszination erzählen, die von den Computermodellen ausgeht. Gleichzeitig zeigen Ihnen warnende Beispiele, dass in diesem Feld nicht alles glänzt. Es lauern etliche Fallstricke, und eine Krise bahnt sich an.

Doch Vorsicht! Dieses Buch ist auch eine Mogelpackung. Wenn Sie ein gewisses Maß an Expertise mitbringen, werden Sie versucht sein, die hier transportierten Inhalte als grenzwertige Trivialisierung hochkomplexer Phänomene zu betrachten. Eben als eine Mogelpackung. Genauso, wenn Sie keinerlei Vorwissen mitbringen und einfach nur neugierig sind. Dann könnte irgendwann bei Ihnen der Verdacht aufkommen, dieses Buch würde versuchen, Ihnen unter dem Deckmantel bunter Bilder und eingängiger Vergleiche ein gesellschaftliches Tabuthema unterzujubeln. Das Tabu nennt sich Mathematik.

Zum Lesen dieses Buches benötigen Sie Wissensdurst sowie Offenheit für Neues und Überraschendes, aber keine Fachkenntnisse. Eine Fülle von Abbildungen veranschaulicht die wesentlichen Zusammenhänge, ergänzt um facettenreiche Anekdoten aus Wissenschaft und Technik. Was Sie so lernen werden: Wie Computermodelle aufgebaut sind und welche Rolle den Algorithmen dabei zukommt. Warum Theorie und Experiment als klassische Quellen der Erkenntnis längst nicht mehr ausreichen. Wie die Entwicklung nach Ende des Zweiten Weltkriegs mit dem Aufkommen der ersten Computer und der ersten numerischen Wettervorhersage begann. Warum die Jahrtausende alte Disziplin der Geometrie eine Renaissance in den Computermodellen erfährt. Was es mit dem von Neumannschen Elefanten auf sich hat. Was die dunklen Seiten der Macht der Computermodelle sind, und was bei einer Simulation schief laufen kann.

Daneben lernen Sie Menschen kennen, die diese Entwicklung vorantreiben. Erlebnisse auf wissenschaftlichen Tagungen, bei Industriekooperationen oder etwa beim Besuch des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg sind in den Text eingestreut. Den Kolleginnen und Kollegen,

die auf die eine oder andere Art zum Gelingen des Buchprojektes beigetragen haben, danke ich ganz herzlich: Jörn Behrens, Annalisa Buffa, Klaus Dreßler, Claus Führer, Tom Grandine, Tom Hughes, Bert Jüttler, Claudia Klüppelberg, Rainer Lachner, Paul Lukowicz, Linda Petzold, Niklas Röber, Robert Rockenfeller, Anita Schöbel, Oskar von Stryk und Christina Surulescu.

Ohne die Zuarbeit in Form von Kommentaren zum Text und Simulationen wäre dieses Werk nicht möglich gewesen. Meinen ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Mané Harutyunyan, Daniela Fußeder, Christoph Heinrich, Steffen Plunder, Alexander Shamanskiy, Anh-Vu Vuong sowie Oliver Weeger gebührt an dieser Stelle ein großes Merci! Genauso geht mein Dank an Milena Röhrs und Fabienne Weisenburger für das Korrekturlesen des Manuskripts und die Indexerstellung.

Ergebnisse und insbesondere Abbildungen aus einer Reihe von öffentlich geförderten Projekten sind in dieses Buch eingeflossen. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Europäischen Union, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und der Volkswagenstiftung danke ich für ihre Unterstützung. Desweiteren haben mich Iris Ruhmann und Anja Groth vom Springer-Verlag stets kompetent und konstruktiv bei diesem Unterfangen begleitet.

Als Student und später als Doktorand durfte ich eine ganze Reihe von Forscherpersönlichkeiten in Vorlesungen und Vorträgen erleben. Neben großem Respekt war ich damals auch von dem Gedanken beseelt, manches anders und besser zu machen. Inzwischen weiß ich, dass gute Lehre und das erfolgreiche Heranführen an die Wissenschaft in gewisser Hinsicht zeitlos sind, trotz aller Moden. Beim Wettstreit der Argumente und Ideen steht immer noch der Mensch im Mittelpunkt. In diesem Sinne schätze ich mich glücklich, mit Peter Rentrop, Roland Bulirsch und Werner C. Rheinboldt drei Wegweisern begegnet zu sein, die mir sehr viel mitgegeben haben. Ihnen ist dieses Buch gewidmet.

Kaiserslautern
im September 2022

Bernd Simeon

Bemerkung zum Sprachgebrauch

Bei der Wahl zwischen guter, kompakter Lesbarkeit und genderspezifisch passender Differenzierung habe ich mich stark vom eigenen Sprachgefühl leiten lassen und eine variable Ausdrucksweise verwendet. Je nach Situation tritt daher das generische Maskulin auf, das alle geschlechtlichen Identitäten einschließt, oder es werden neutrale oder alle Geschlechter einbeziehende Formulierungen gewählt.

Inhaltsverzeichnis

1	Streifzug durch eine neue Ära	1
1.1	Digitale Patienten	1
1.2	Szenarien zum Klimawandel	4
1.3	Testfahrt im Simulator	7
1.4	Faszination künstliche Intelligenz	10
1.5	Themen und Thesen	12
2	Die Roboter kommen	15
2.1	Was ist ein Roboter?	15
2.2	Bewegung als Fluss	18
2.3	Anschaungsunterricht im Robotiklabor	25
2.4	Fahrsimulator 2.0	32
2.5	Komplexität und Modellvielfalt	35
3	Computermodelle bahnen den Weg	43
3.1	Unendliche Weiten	43
3.2	Ein stiller Triumph	50
3.3	Am Anfang war das Wetter	57
3.4	Mit Kondition ins Chaos	72
3.5	Das Klima im Blick	81
4	Wo viel Licht...	89
4.1	Niemand trete ein ohne Kenntnis der Geometrie	89
4.2	Den Zufall bändigen	99

XIV	Inhaltsverzeichnis	
4.3	Wenn Computermodelle danebenliegen	111
4.4	Die dunkle Seite der Macht	120
5	Lernende Modelle	127
5.1	Tohuwabohu	127
5.2	Maschinen aus feuernden Neuronen	136
5.3	Wo steckt HAL 9000?	143
6	Zu neuen Ufern in der Biomedizin	147
6.1	Tom Hughes war auch schon da	147
6.2	Regenerative Meniskustherapie	152
6.3	COVID-19	158
6.4	Wie dick ist die Großhirnrinde?	171
7	Quo Vadis	181
7.1	Zurück in die Zukunft	181
7.2	Quelle der Erkenntnis oder Orakel	185
	Literatur	191
	Stichwortverzeichnis	197



1

Streifzug durch eine neue Ära

Worum geht es? Computermodelle tasten die Wirklichkeit immer besser ab und haben sich in Kombination mit mächtigen Algorithmen zum wesentlichen Werkzeug des Erkenntnisgewinns entwickelt. Mit diesem Vormarsch der berechenbaren Welt geht eine unaufhaltsame Mathematisierung einher, die sämtliche Wissenschaftsdisziplinen wie auch viele Lebensbereiche tief durchdringt. Die vermeintliche Exaktheit von Zahlen und Formeln und die suggerierte Unfehlbarkeit des Computers erzeugen dabei häufig blindes Vertrauen, schüren aber aber auch Ängste: Sind wir, wie Goethes Zauberlehrling, schon tief im Netz der Computer und Algorithmen verstrickt und verlieren die Kontrolle? Kommen Sie mit auf einen Streifzug durch die aktuelle Entwicklung und lernen Sie anhand von Episoden aus Wissenschaft und Technik die Themen dieses Buches kennen wie auch die Menschen, die die Entwicklung vorantreiben.

1.1 Digitale Patienten

Stolz führt Rainer Lachner durch den brandneuen Firmensitz der Brainlab AG auf dem ehemaligen Flughafengelände in München-Riem. Prunkstück ist der denkmalgeschützte Tower, in den repräsentative Besprechungsräume, ein großes Yoga-Zimmer, Show-Operationssäle und ein luftiger Lounge-Bereich auf dem Dachgeschoss eingebaut wurden. Selbst Bundeskanzlerin Merkel kam zur Eröffnung und machte dem Vorzeigeunternehmen ihre Aufwartung.

Rainer Lachner kenne ich aus der gemeinsamen Zeit des Mathematikstudiums an der TU München. Nach der Promotion fing er 1996 bei der damals

ganz jungen Firma an, die heute ein Global Player in der Medizintechnologie mit 1500 Mitarbeitern weltweit ist. Brainlab verkauft zwar modernste Operationssäle, stellt selbst aber keine Geräte her. Das Kerngeschäft konzentriert sich auf die unsichtbare, softwaregesteuerte Welt in den Apparaten. Zu jedem Zeitpunkt eines Eingriffs, vom Planungsstadium über die eigentliche Operation bis zur Nachsorge, sollen der Chirurg und sein Team all das sehen und messen können, was sich ihrem bloßen Auge entzieht.

Nach wie vor ist Lachner im Bereich der medizinischen Bildverarbeitung tätig und leitet dort als *Software Principal* die Entwicklung und Umsetzung neuer Algorithmen. Wie kann man Tumorgewebe von gesundem Gewebe in einem MRT-Scan (MRT – Magnetresonanztomographie) unterscheiden? Wie kann man dem Chirurgen bei der Operation mit minimalinvasiven Instrumenten präzise Entscheidungshilfen geben? Wie kann man aus medizinischen Bilddaten frühzeitig, noch vor den ersten klinischen Symptomen, Krankheiten diagnostizieren? Antworten auf diese Fragen liefern ausgefeilte Algorithmen, die die Pixelstruktur der Bilddaten verwenden. In Kap. 6 werden Sie tiefer in diese Fragen eintauchen und exemplarisch ein Computermodell kennenlernen, mit dem man die Dicke der Großhirnrinde als Frühdiagnostik für Demenzerkrankungen bestimmen kann, Abb. 1.1.

Das Wort *Algorithmus* geht auf den arabischen Mathematiker al-Chwarizmi aus dem 9. Jahrhundert n. Chr. zurück. Es hat mittlerweile einen negativen Beigeschmack, der durch die Debatte um Big Data und künstliche Intelligenz aufgekommen ist. Algorithmen führen Schritte aus, um ein *mathematisches Modell* zahlenmäßig zu berechnen. Solch ein Modell wird mit der Formelsprache der Mathematik beschrieben und stellt Zusammenhänge zwischen den re-

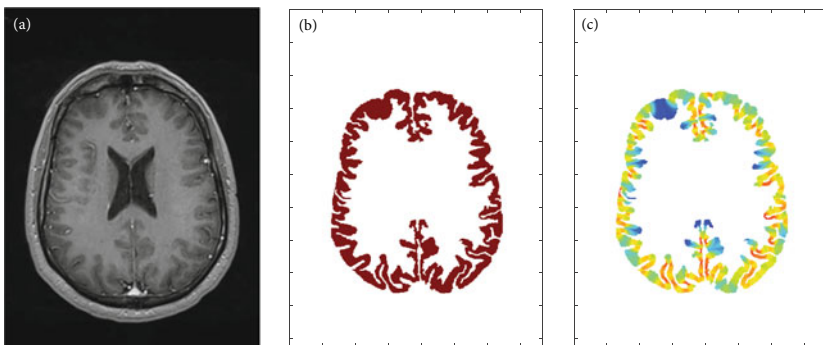


Abb. 1.1 (a) Original MRT-Bilddaten als Schnitt durch das menschliche Gehirn (384 × 512 Pixel, © BRAINLAB AG). Die grau erscheinende Großhirnrinde ist als segmentierte Bildstruktur in (b) dunkelrot dargestellt. Das Ergebnis der Dickenberechnung zeigt (c), wobei dünne Regionen rot eingefärbt sind

levanten Größen eines Systems her. Das Modell ist also eine Nachbildung der Wirklichkeit, die oft sehr grob ausfällt und nur begrenzte Gültigkeit hat. Der Algorithmus ermöglicht das Experimentieren mit dem mathematischen Modell – die Computersimulation oder *numerische Simulation*, wobei das geheimnisvolle Adjektiv *numerisch* nichts anderes als *zahlenmäßig* bedeutet.

Das Ergebnis einer Computersimulation sind Zahlen, nicht nur einige wenige, sondern meist Millionen oder auch Milliarden von Zahlen, die in Form von bunten Animationen und grafischen Darstellungen aufbereitet werden müssen, um daraus Schlüsse ziehen zu können. Die Aussagefähigkeit der Simulation steht und fällt dabei mit der Qualität des Modells wie auch dem Vorhandensein von ausreichenden Daten, wobei der Algorithmus das ausführende Organ ist. Obwohl streng genommen das mathematische Modell und seine Simulation auf dem Computer begrifflich getrennt werden sollten, hat sich in der Öffentlichkeit die Bezeichnung *Computermodelle* eingebürgert, die beide Aspekte umfasst. In diesem Buch werde ich Computermodelle ebenfalls als Oberbegriff verwenden und nur wenn nötig zwischen dem mathematischen Modell, seiner numerischen Simulation und dem ihr zugrunde liegenden Algorithmus unterscheiden.

Beim Gespräch mit Rainer Lachner und seinen Kollegen geht es insbesondere um die stürmische Entwicklung der künstlichen Intelligenz (KI). In vielen Bereichen der Bildverarbeitung erzielen spezialisierte neuronale Netze, sogenannte *Faltungnetze* (auf Englisch *convolutional neural networks*), inzwischen Ergebnisse, die den klassischen Methoden überlegen sind. Doch mangelt es noch an der für die klinische Praxis notwendigen Zuverlässigkeit. Pathologische Ausnahmefälle, die nicht im Trainingsdatenbestand erfasst sind, führen häufig zum Versagen, weshalb die Zulassung von Methoden der KI von den zuständigen Behörden wie der amerikanischen FDA, der Food and Drug Administration, sehr restriktiv gehandhabt wird. Umso wichtiger sind umfassende Bestände an Patientendaten, die bei Brainlab in anonymisierter Form archiviert werden. Mit jedem Laborbefund, jeder Computertomographie, MRT- oder Ultraschalluntersuchung wächst die Datenmenge zu einem Patienten an. Die Zukunftsvision des *digital twins*, eines digitalen Zwillings, der dem Arzt Auskunft über die gesamte Krankengeschichte gibt und eine langfristige Vorhersage des Gesundheitszustandes erlauben soll, rückt somit immer näher.

So faszinierend diese Perspektive zunächst erscheint, ruft sie bei manchem gewiss auch Beklemmung hervor. Werden wir in Zukunft als Patienten zu einem Objekt degradiert, das von einer komplexen Maschinerie gescannt, gecoacht und optimiert wird? Erste Ansätze, den persönlichen Arzt und Therapeuten durch Algorithmen zu ersetzen, werden bereits erprobt. Die Computermodelle läuten damit einen umfassenden Wandel in der Medizin ein. Im

nächsten Wissenschaftsfeld sind sie bereits viel stärker etabliert und Dreh- und Angelpunkt des Erkenntnisgewinns.

1.2 Szenarien zum Klimawandel

Der Klimawandel mit seinen Ursachen und Folgen ist eines der Themen unserer Zeit. Wie bei kaum einer anderen Frage hängt unser Wissen über diese anthropogene, also durch den Menschen verursachte, Klimaänderung von Computermodellen und den daraus berechneten Vorhersagen ab. Doch können wir den Erkenntnissen der Wissenschaft trauen und darauf aufbauend die richtigen Maßnahmen ergreifen, um die globalen Auswirkungen unter Kontrolle zu bekommen?

In Hamburg bin ich mit Jörn Behrens verabredet. Er lehrt numerische Mathematik an der Universität Hamburg und forscht im Rahmen des Exzellenz-Clusters CLICCS (Climate, Climatic Change, and Society) an Algorithmen für die Lösung der äußerst komplexen Modellgleichungen, die die Abläufe in unserer Atmosphäre beschreiben. Behrens war auch maßgeblich an der Entwicklung eines Tsunami-Frühwarnsystems beteiligt, das als Reaktion auf das katastrophale Seebeben vor Sumatra an Weihnachten 2004 inzwischen im indischen Ozean installiert wurde.

Zufällig ist Unitag, die Corona-Krise liegt noch weit in der Zukunft, und der Universitätscampus nördlich des Dammtorbahnhofs quillt über von neugierigen Schülerinnen und Schülern. Behrens und ich verziehen uns in ein Café und diskutieren alsbald über Klima- und Wetterprognosen. Obwohl beiden im Prinzip dieselben physikalischen Prozesse zugrunde liegen, gibt es doch bedeutende Unterschiede. Die Wettersimulation bezieht sich auf kurze Zeiträume von mehreren Tagen, für die Unmengen an aktuellen Beobachtungsdaten als Korrektiv zur Verfügung stehen. Die aus der Simulation abgeleitete Prognose muss möglichst detailliert regionale Effekte berücksichtigen und wird laufend aktualisiert. Bei der Klimasimulation geht es um Prognosen über Jahrzehnte bis Jahrhunderte, wobei vor allem Durchschnittsgrößen wie die mittlere Jahrestemperatur im Jahr 2050 in Mitteleuropa von Interesse sind. Eichen kann man die Modelle für den Klimawandel nur mit Daten der Vergangenheit, etwa aus Eisbohrkernen oder Jahresringen von Bäumen, doch in einer Zeit des Wandels müssen auch die Computermodelle die Veränderungen abbilden und können nicht so einfach an der Gegenwart oder Vergangenheit abgeglichen werden. Hierin liegt eine der wesentlichen Herausforderungen.

Eine zweite Herausforderung tritt auch bei der Wettersimulation auf: Die Vorgänge in unserer Atmosphäre bilden ein sogenanntes *chaotisches System*.

Mit diesem Begriff beschreibt die Mathematik Problemstellungen, die extrem empfindlich von den Anfangsdaten abhängen. Kleine Störungen resultieren in dramatischen Änderungen der Lösung, was mit einem zum Sprichwort gewordenen Vergleich, dem *Schmetterlingseffekt*, auf den Punkt gebracht wird. Der Flügelschlag eines Schmetterlings am Amazonas kann demnach das Wettergeschehen in Texas beeinflussen. Diese Metapher ist so griffig wie sehr stark verkürzt und bedarf einer näheren Analyse, die in Kap. 3 thematisiert wird. Jedenfalls kann man sich bei der Wetter- wie der Klimasimulation nicht auf die Ergebnisse eines Simulationslaufes verlassen. Stattdessen fährt man eine Reihe davon und bildet ein *Ensemble* von Prognosen, aus dem dann durch Mittelung und Erfahrungswerte der wahrscheinlichste Verlauf bestimmt wird. Sie kennen das vielleicht aus der langfristigen Wettervorhersage im Fernsehen, bei der für die Temperaturentwicklung in den nächsten zwei Wochen eine spezielle Grafik gezeigt wird. Sie zeigt ein immer breiter werdendes Band an möglichen Temperaturverläufen, das nach oben und unten durch Maximal- und Minimalwerte begrenzt wird. Der wahrscheinlichste Verlauf liegt ungefähr in der Mitte des Bandes und ist als Kurve farbig hervorgehoben. Die Simulationsläufe für solch ein Ensemble an Prognosen erfordern alles an Rechenpower, was das Supercomputing heute zur Verfügung stellt.

Im Deutschen Klimarechenzentrum, das am Exzellenz-Cluster CLICCS, wie auch das Max-Planck-Institut für Meteorologie, beteiligt ist, treffen wir Niklas Röber. Er ist Informatiker und für die Visualisierung der Unmengen an Simulationsdaten verantwortlich. An einem esstischgroßen Touchscreen führt er uns eine Auswahl aktueller Simulationsläufe vor, darunter eine globale Wetteranalyse über mehrere Tage, bei der die Wechselwirkung zwischen Ozeanen und Atmosphäre im Detail modelliert wurde, um daraus Rückschlüsse für die langfristigen Klimamodelle zu ziehen. Die herbstliche Hurrikansaison in der Karibik ist angebrochen, und fasziniert beobachten wir, wie neue Wirbelstürme über dem warmen Atlantik vor Westafrika entstehen und dann Richtung Mittelamerika ziehen, Abb. 1.2.

Die Simulation basiert hier auf einer geschichteten gitterartigen Struktur, die die Erde mit dreieckigen Zellen von 2,5 km Durchmesser horizontal überzieht und vertikal über 140 Schichten in die Atmosphäre reicht. In jeder Zelle werden bis zu 100 verschiedene physikalische Größen berechnet, darunter Wind, Druck, Feuchte, Temperatur und die Atmosphärenchemie. Hinzu kommt das Modell für die Ozeane und die Wechselwirkung mit der Atmosphäre. Solch ein Simulationslauf kann dann ohne Weiteres für sechs Wochen den Supercomputer Mistral im Dachgeschoss des Zentrums komplett auslasten. Bei einem Rundgang zeigt uns Röber dessen Hardware und die dafür nötige Infrastruktur. Mistral schafft 3,6 Petaflops, wobei *flops* für *floating point*

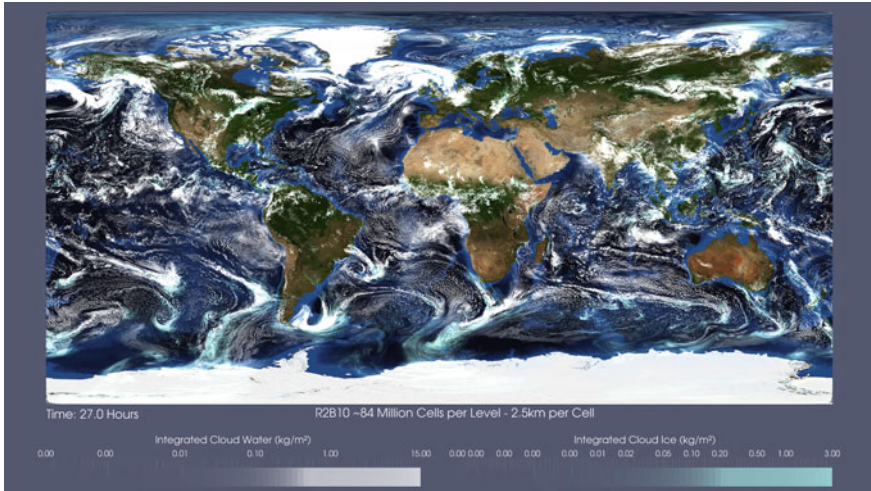


Abb. 1.2 Momentaufnahme einer globalen Wetteranalyse mit Modellierung der Wechselwirkung zwischen Ozeanen und Atmosphäre. © DKRZ/MPI-M Hamburg, Projekt ESIWACE

operations per second, also für Rechenoperationen pro Sekunde, steht und die griechische Silbe *peta* für eine bestimmte Zehnerpotenz. Konkret bedeutet ein Petaflops $10^{15} = 1.000.000.000.000.000$ Rechenoperationen pro Sekunde. Damit nimmt Mistral einen respektablen vorderen Mittelfeldplatz in der Rangliste der 500 schnellsten Supercomputer weltweit ein.

In ungerechnet nur 5 min führt Mistral die unvorstellbare Zahl von einer Trillion Rechenoperationen aus. Eine Trillion ist eine 1 mit 18 Nullen, ausgeschrieben $10^{18} = 1.000.000.000.000.000.000$. Während eines Simulationslaufes häuft Mistral gleichzeitig einen gigantischen Berg an Zahlen an, der ohne Weiteres 10 Terabyte an Speicherplatz erfordern kann. Dabei bezeichnet ein Terabyte $10^{12} = 1.000.000.000.000$ Byte, das sind etwa 500.000 Bücher à 1000 Seiten voller Zahlen. Aus dieser Datenmenge kann natürlich kein Mensch etwas ablesen, und entsprechend kommt der Aufbereitung in Form von Grafiken und Animationen eine große Bedeutung zu. Anders als etwa die eingangs diskutierte medizinische Bildverarbeitung ist die Klima- und Wettersimulation damit auf modernste – und entsprechend teure – Hardware zwingend angewiesen. Das ist nicht nur heute so. De facto war diese Wissenschaft einer der Wegbereiter der Computerentwicklung und hat schon immer enorme Ressourcen verschlungen, wie Sie im Kap. 3 noch erfahren werden.

Kann man den Prognosen zum Klimawandel trauen? Wie viel Unsicherheit steckt in den Modellgleichungen, und wie genau und verlässlich berechnen die Algorithmen ihre Lösung? Behrens gibt eine vorsichtig positive und dif-

ferenzierte Antwort. In seinen Augen sind die Berichte des Weltklimarates *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)*, an denen Tausende Wissenschaftler weltweit mitarbeiten, fundiert und dienen zu Recht als Basis für politische Entscheidungen. Als wichtiges Argument führt er an, dass in die Klimaforschung eine Vielfalt an Modellrechnungen aus konkurrierenden Forschergruppen eingehen, wodurch ein großes Ensemble an Prognosen gebildet und die nicht wegzudiskutierende Unsicherheit der Modelle und Daten abgedeckt wird. Als Mathematiker macht ihm aber die Methodik in der Klimasimulation Sorge, insbesondere angesichts der immer komplexer werdenden Phänomene, an die man sich herantraut.

Die Trennung von Modellgleichung und ihrer zahlenmäßigen Lösung ist ein zentrales Paradigma der numerischen Mathematik, denn nur so kann man die Lösungsverfahren vollständig analysieren und ihre *Konvergenz* nachweisen. Der Begriff der Konvergenz bezeichnet dabei die Annäherung der Computersimulation an die unbekannte exakte Lösung bei hinreichend feiner Berechnung. Die gängige Praxis verwendet häufig Teilmodelle, die für eine speziell dimensionierte Rechenzelle aufgestellt werden und sich einer Kontrollrechnung mit feineren Rechenzellen entziehen. Offensichtlich besteht hier eine Diskrepanz zwischen dem, was man modelliert und simuliert, und dem, was man nach strengen mathematischen Maßstäben verstanden hat.

Diese Diskrepanz findet man nicht nur in der Wetter- und Klimasimulation vor. Sie ist eine der großen Herausforderungen in der aktuellen Entwicklung.

1.3 Testfahrt im Simulator

Ortstermin Baustelle. Nach einer gemächlichen Runde übers Gelände darf ich endlich loslegen und mit dem Baggern beginnen. Die Bedienung der beiden joystick-ähnlichen Steuerhebel ist im Nu erlernt – schon senkt sich auf mein Kommando die Baggerschaufel tief in die Erde. Starke Kräfte wirken auf die Fahrerkabine und drücken mich nach hinten in den Sitz. Schnell ist vergessen, dass ich mich nicht in einem realen Bagger auf einer realen Baustelle befinde, sondern im Fahrsimulator *RODOS (Robot based Driving and Operation Simulator)* des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Kaiserslautern. Unter einer großen Kuppel steht hier ein 3 t schwerer Industrieroboter, auf dessen Arm in 5 m Höhe die Fahrerkabine montiert ist. Täuschend echt ahmt der Roboter die Baggerbewegung nach, und zusammen mit der auf die Kuppel projizierten animierten Baustellenszenerie ergibt sich eine nahezu perfekte Illusion. Nicht nur Baustellenfahrzeuge, sondern eine ganze Palette an Nutzfahrzeugen und herkömmlichen PKW wird hier mittels

virtueller Testfahrten auf Herz und Nieren erprobt, um das Zusammenspiel von Mensch und Maschine zu verbessern.

Mit Klaus Dreßler, dem zuständigen Bereichsleiter und Ideengeber des Simulators, sitze ich anschließend zusammen und spreche über die Besonderheiten von RODOS. Dreßler kennt die Wissenschaftswelt genauso wie die Arbeitsweise in den Laboren der Fahrzeugindustrie aus dem ff. Nach Studium und Promotion in Mathematik war er lange Jahre bei einem Software-Haus tätig, das Werkzeuge für die Fahrzeugsimulation entwickelt. Dieser Erfahrungsschatz kommt ihm im Fraunhofer ITWM sehr zupass, das immer wieder neu den Spagat zwischen angewandter Forschung und Industrieaufträgen zu bewerkstelligen hat [1].

Mit RODOS hat Dreßler einen lange gehegten Traum verwirklicht und das Portfolio des Fraunhofer ITWM um eine wichtige Praxiskomponente erweitert. Solche Simulatoren sind heute weit verbreitet, vor allem in der Luft- und Raumfahrt, aber zunehmend auch in der Fahrzeugindustrie. Neben dem Training des Bedienpersonals steht das Erproben von Grenzsituationen, die bei einem realen Prototypen schnell zum Totalschaden führen würden, im Mittelpunkt. Je wirklichkeitsgetreuer die Interaktion von Mensch, Maschine und Umwelt umgesetzt wird, desto aussagekräftiger sind die Resultate für die Entwickler. Um die Nutzungsmöglichkeiten des Simulators möglichst breit zu fächern, kann man in RODOS aus einer Datenbank, die laufend erweitert wird, Straßennetze, Bodenprofile und zahlreiche weitere Umgebungsparameter einbinden. Die Grenze zwischen Realität und Simulation verschwimmt so immer mehr (Abb. 1.3).

Ausgefeilte Algorithmen steuern den Roboter mit der Fahrerkabine und gewährleisten, dass sich die durchgeführten Manöver wie echt anfühlen. Die wesentliche Anforderung besteht dabei in der *Echtzeitfähigkeit*: Betätigt der Fahrer einen Steuerhebel, gibt Gas oder bremst, so muss der Roboter genauso schnell wie in Realität darauf reagieren und innerhalb von Sekundenbruchtei-

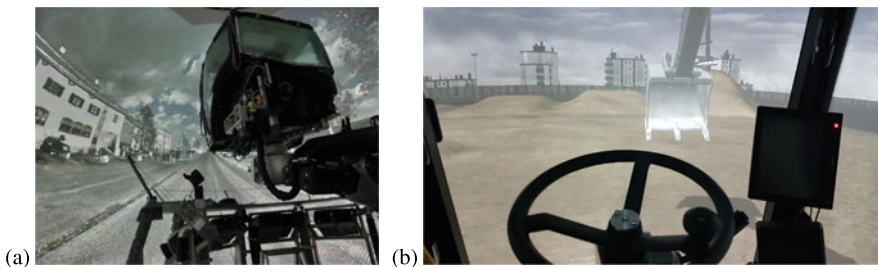


Abb. 1.3 Fahr Simulator RODOS. (a) Blick auf die auf einem Industrieroboter montierte Fahrerkabine (© Fraunhofer ITWM). (b) Beim Baggern auf der Baustelle

len die resultierende Bewegung durchführen. Das mathematische Modell, auf dessen Grundlage die Systemantwort berechnet wird, ist entsprechend einfach und robust gehalten, genauso wie der Lösungsalgorithmus. Eine Millisekunde, das ist die typische Taktzeit, innerhalb derer der Simulator den nächsten Antwortimpuls benötigt. Auf den ersten Blick haben Computerspiele ein ähnliches Anforderungsprofil, aber bei ihnen reicht es aus, wenn alles nur echt erscheint. Bei einem Fahr Simulator wie RODOS jedoch müssen Größen wie Beschleunigungen und Kräfte genau genug berechnet werden, um tatsächlich Rückschlüsse auf die Auslegung des technischen Systems ziehen zu können. Falls das Ihnen zu vage erscheint – im nächsten Kapitel werden Sie mehr über die Robotik und die dahintersteckenden Modelle und Algorithmen erfahren.

Könnte man nicht auch den Menschen durch ein Modell ersetzen, das die entsprechenden Kommandos generiert, und auf diese Weise eine komplett virtuelle Simulation durchführen? Oder Systeme für das *autonome Fahren* einbinden und sehr wirklichkeitsgetreu im Fahr Simulator testen? Tatsächlich sind das drängende Fragen, an denen aktuell weltweit geforscht wird. Das Nachahmen des menschlichen Verhaltens in einem *digitalen Menschmodell*, das in einer Vielzahl von Situationen sinnvoll reagiert, stellt sich hierbei als wesentliche Herausforderung heraus. Statt konventioneller Modellierung mittels mathematischer Gleichungen und expliziter, äußerst aufwändiger Programmierung werden hierfür die Methoden des maschinellen Lernens immer wichtiger.

Mit Klaus Dreßler verfolge ich diesen Trend auf dem alle zwei Jahre stattfindenden Daimler Digital Product Forum. Alle Bereiche des Automobilkonzerns, die mit Informationstechnologie (IT) zu tun haben, nehmen an dieser Messe teil und präsentieren, zusammen mit externen Anbietern, Forschungsinstituten und Universitäten, neue Produkte und Softwarelösungen. Mehrere tausend Teilnehmer haben trotz der drückenden Julihitze den Weg in die Messehallen am Stuttgarter Flughafen gefunden, verfolgen die zahlreichen Vorträge und besuchen die Messestände der Aussteller. „Daten sind das neue Öl“ ist einer der morgendlichen Vorträge aus dem Top-Management betitelt, und diese Schlagzeile trifft die allgemeine Stimmung sehr gut. Von der Diesellaffäre ist dagegen keine Rede, und auch die Elektromobilität spielt keine prominente Rolle. Stattdessen geht es, ähnlich wie in der Medizin, um die Zukunftsvision des *digital twin*, der als virtuelle Kopie des realen Fahrzeugs in der Firmenzentrale vorrätig gehalten wird. Das reale Fahrzeug kommuniziert permanent mit der Zentrale und sendet die Daten zahlreicher Sensoren, die alle wichtigen Komponenten, vom Motor über die Reifen bis zur Bordelektronik, überwachen. Aus diesem gewaltigen Berg an Daten filtern Algorithmen dann zum einen Ausfallwahrscheinlichkeiten für das spezifische Fahrzeug heraus, zum anderen will man aber so die gesamte Modellklasse analysieren und ihr Design