



## 42. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium  
Aachen 2012

**Hochwasser – eine Daueraufgabe!**

12. und 13. Januar 2012

# Simulierte Wissenschaft oder Erkenntniswerkzeug?

## Ein philosophischer Blick auf Computersimulationen in der Wasserwirtschaft

Rafaela Hillerbrand

### Zusammenfassung

Numerische Simulationen ersetzen heute in vielen anwendungsbezogenen Kontexten oftmals kostspielige oder gar nicht realisierbare materiale Experimente. Numerik hilft fehlende analytische Lösungen zu approximieren, gerade dann, wenn die Randbedingungen, wie in der ingenieurwissenschaftlichen Praxis üblich, sehr komplex sind. Aber können Computersimulationen wirklich Experimente und Theorie ersetzen? Sind numerische Prognosen genauso verlässlich wie analytische Vorhersagen? Gerade dort, wo wie in der Wasserwirtschaft hohe Anforderungen an die Verlässlichkeit der Modellrechnungen gestellt werden, stellen sich derartige Fragen mit besonderer Dringlichkeit. In dem vorliegenden Beitrag wird analysiert, inwieweit Prognosen, die mit Computersimulationen gewonnen wurden, analytischen Vorhersagen auf erkenntnistheoretischer Ebene gleichgestellt sind. Weiterhin werden die Begriffe der Validation und Verifikation, die in den numerischen Wissenschaften einen großen Stellenwert einnehmen, kritisch beleuchtet und gefragt, ob Computersimulationen die Wissenschaftstheorie vor genuin neue Probleme stellt. Der vorliegende Artikel soll somit einen ersten Beitrag leisten, hin zu einer besseren Einschätzung numerischer Ergebnisse mit Bezug auf ihre epistemische Verlässlichkeit.

## 1 Computersimulationen in der Hydrodynamik

Seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts nehmen numerische Simulationen als Methode in den empirischen Wissenschaften neben theoretischen und experimentellen Untersuchungen einen immer größeren Stellenwert ein. Auch in den Anwendungen der ingenieurwissenschaftlichen Praxis ersetzen Simulationen oftmals kostspielige experimentelle Messungen; fehlende analytische Lösungen mathematischer Modelle lassen sich numerisch approximieren. So leistet etwa die *Computational Fluid Dynamic*, CFD, für die Wasserwirtschaft zunehmend wichtige und unentbehrliche Dienste. Dieses doch recht neue und, bezogen auf die Publikationszahl, rasch wachsende Forschungsgebiet kann auf große Erfolge verweisen – zumindest dann, wenn Erfolg mit den technischen Möglichkeiten gleichgesetzt wird, die sich aus der entsprechenden Forschung ergeben. So lassen sich etwa mit Hilfe von *Large-Eddy-Simulationen* turbulente Strömungen in Seen oder Wasserreservoirs abbilden (Rettmeier, Bergen, van Linn 2001), Finite-Elemente-Methoden werden bei der Simulation zweidimensionaler Strömungen

eingesetzt (z. B. Schwanenberg & Harms 2004) und die Statiker verlassen sich beim Deichbau auf die numerischen Rechnungen des Hydrodynamikers (z. B. Roger et al. 2008).

Allerdings stellt sich die Frage, ob denn der Erfolg in der Anwendung tatsächlich ein gutes Indiz für die Güte der wissenschaftlichen Beschreibungen ist? Das geozentrische Weltbild vermochte viele Beobachtungen vorherzusagen und viele Himmelsphänomene zu erklären – dennoch erwies es sich schlicht als falsch. Erfolg in der Anwendung und Korrektheit einer Theorie sind zwei ganz unterschiedliche Dinge. Und Entsprechendes mag für Methoden wie Computersimulationen gelten. Begriffe wie *fudge factors* bei Klimasimulationen oder *tuning parameters* bei Monte Carlo Simulationen scheinen die Vermutung nahezu legen, dass die empirische Adäquatheit einer numerischen Untersuchung nichts aussagen muss über die Korrektheit der Simulationen bzw. des ihr zugrunde liegenden Modells (vgl. Hillerbrand 2012). Dies hat gerade in anwendungsbezogenen Kontexten wie dem Wasserbau u. U. weitreichende Folgen. Wenn die bisher gute Prognosekraft nichts über den zukünftigen Erfolg eines numerischen Modells aussagt, warum kann oder sollte sich der Statiker beim Deichbau dann überhaupt auf die numerischen Prognosen der Hydrodynamik zum Strömungsverhalten verlassen? Dass diese Prognosen oftmals alternativlos sind, mag eine pragmatische, aber doch nicht ganz befriedigende Antwort sein.

Während wir bei Theorie und Laborexperimenten wie Feldversuchen auf eine lange Tradition innerhalb der Wissenschaften und der wissenschaftsreflexiven Disziplinen zurückblicken können, ist die Methode der numerischen Simulation doch noch relativ neu. Kann sie wirklich fehlendes theoretisches Verständnis oder aufwendige, kostspielige, ja z.T. sogar unmöglich zu realisierende experimentelle Untersuchungen ersetzen? Die Wissenschaftstheorie als Teilgebiet der Philosophie widmet sich derartigen Fragen und fragt so nach dem epistemischen, d. h. erkenntnistheoretischen, Status von Computersimulationen.

Zur Klärung des erkenntnistheoretischen Status von Simulationen, werden in diesem Artikel zunächst drei Arten von Simulationen nach den durch sie erhobenen epistemischen Ansprüchen unterscheiden (2). Es wird die Frage gestellt, ob nicht zumindest diejenige Computersimulationen, die vorwiegend der Lösung analytischer Gleichungssysteme dienen, reine Mittel theoretischer Analyse sind und damit nichts anderes als die zeitgemäße Variante des klassischen Gedankenexperimentes (3). Die Begriffe ‚Validation‘ und ‚Verifikation‘, die in den numerischen Wissenschaften eine zentrale Rolle spielen, werden aus epistemischer Sicht auf ihren Anspruch geprüft (4). Der in diesem Artikel angerissene epistemische Diskurs um Computersimulationen wird abschließend in Zusammenhang mit den allgemeinen Fragen der Wissenschaftstheorie gebracht (5).

## 2 Drei Arten von Computersimulationen

Unter ‚Typ-I-Simulationen‘ werden diejenigen Simulationen subsummiert, die Informationen über mathematische Systeme liefern sollen. Ein Beispiel hierfür ist der ‚Computerbeweis‘ des Vierfarbensatzes, der zeigt, dass in der euklidischen Ebene vier Farben ausreichen, um eine Karte derart einzufärben, dass niemals zwei benachbarte Flächen die gleiche Farbe haben. Die typischeren Beispiele für Typ-I-Simulationen sind allerdings numerische Lösungen von Gleichungssystemen (i. Allg. Differentialgleichungssystemen), die analytisch (noch) nicht lösbar sind. In der Fluiddynamik ist hier die Simulation der dreidimensionalen inkompressiblen Euler-Gleichung hervorzuheben. Die Eulergleichung beschreibt Strömungen reibungsfreier Fluide und stellt somit den Grenzfall der Navier-Stokes-Gleichung für den Fall verschwindender Viskosität dar. Bei der numerischen Untersuchung steht insbesondere die Suche nach sog. finite-time-Singularitäten im Vordergrund, da diese infinitesimalen Störungen, die in endlicher Zeit beliebig anwachsen, mit den Charakteristika turbulenter Strömungen in Verbindung gebracht werden. Typ-I-Simulationen dienen oftmals als (vorläufiger) Ersatz für fehlendes theoretisches Verständnis (vgl. Hillerbrand 2010, 2012).

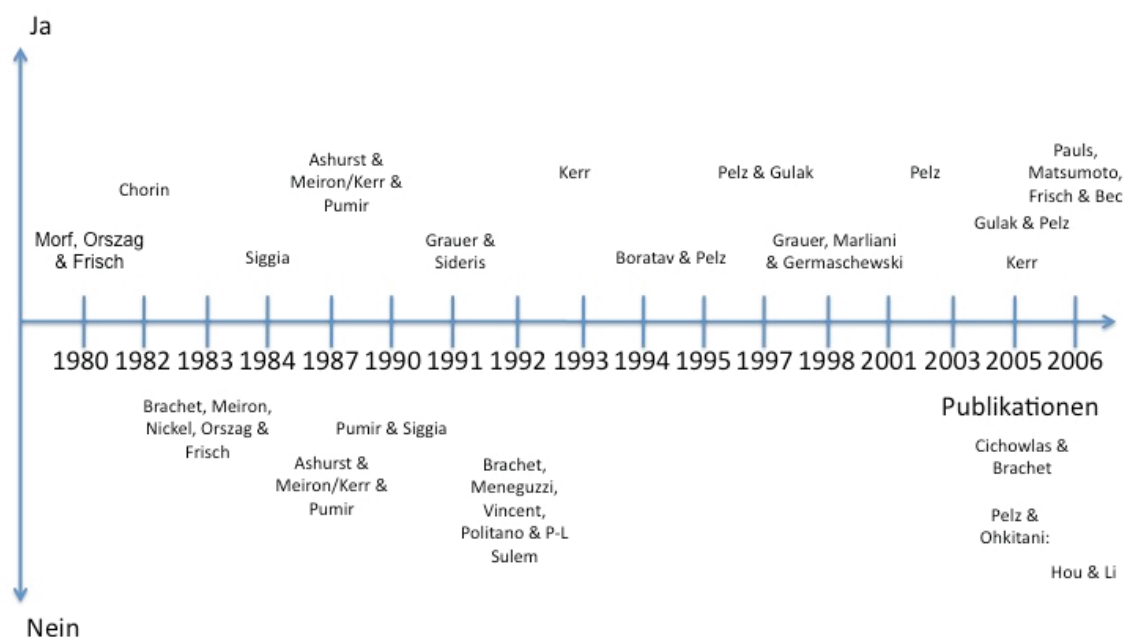


Abb. 1: Publikationen, die mit Hilfe von Computersimulationen finite-time-Singularitäten in der dreidimensionalen Euler-Gleichung suchen, aufgetragen als Funktion der Zeit (angegeben in Jahreszahlen).

Die Publikationen, die in der oberen Hälfte abgedruckt sind, bejahen die Frage nach der Existenz derartige Singularitäten auf Grundlage ihrer Simulationsergebnisse, die Publikationen in der untern Hälfte leugnen die Existenz von finite-time-Singularitäten auf Basis ihrer Simulationsergebnisse. Dabei ist wichtig zu beachten, dass zwischen den einzelnen Publikationen nicht nur das numerische Verfahren verfeinert wurde, sondern insbesondere die Rechnerleistung stieg.

Als Typ-II-Simulationen werden all jene Simulationen bezeichnet, die Informationen über Systeme liefern, welche experimentell (noch) nicht zugänglich sind. Beispiele liefern etwa die Simulation turbulenter Strömungen auf kleinen Skalen. So schreiben etwa J. Schumacher, M. S. Emran und B. Eckhardt (2008):

*„In the absence of an analytical theory, direct numerical simulations (DNS) of the underlying fluid transport equations are the most promising approach to uncover these statistical and structural properties of turbulence, where the steepest gradients and their statistics can be resolved. Experiments cannot yet reach the finest scale filaments, despite significant progress in measurement techniques.“*

Die räumliche wie zeitliche Struktur turbulenter Strömungen auf sehr kleinen Skalen ist wichtig für das Verhalten der Strömung, allerdings im Laborexperiment trotz aller Fortschritte in der Entwicklung von Messverfahren derzeit nicht zugänglich. Zu diesen kontingenten Einschränkungen, denen materiale Experimente unterliegen, kommen noch prinzipielle Beschränkungen, die durch numerische Simulationen umgangen werden können. So lässt sich etwa in der numerischen Simulation von Suspensionen träger Teilchen (inertial particles) systematisch die Auswirkung der Teilchenträgheit auf das Clusterverhalten untersuchen. Andere Effekte als die Trägheit – etwa die endliche Größe der Teilchen oder ihre gravitative Wechselwirkung – lassen sich in der Simulation einfach ausblenden, während hingegen im realen Experiment diese Faktoren nicht isoliert betrachtet werden können. Weiterhin sind Simulationen gerade in der Form von Monte-Carlo-Algorithmen oftmals wichtiger Bestandteil bei der Erhebung experimenteller Daten, etwa im Bereich der Neurowissenschaften und der Hochenergiephysik (Hillerbrand 2012). Typ-II-Simulationen dienen dabei immer dem vorläufigen und zum Teil partiellen Ersatz materieller Experimente.

Typ-III-Simulationen dienen im Gegensatz zu den beiden anderen Arten nicht primär dem Erkenntnisgewinn. Sie zielen vielmehr darauf ab, das Verhalten realer (i. Allg. komplexer) Systeme vorherzusagen, für die es derzeit keine akzeptierte theoretische Beschreibung gibt. Auch hier sind die Anwendungsfelder sehr divers und erstrecken sich von der ingenieurwissenschaftlichen Hydrodynamik, die nicht nur im Wasserbau, sondern auch im Flug- und Fahrzeugbau ihre Anwendung findet, über das Chemieingenieurwesen bis hin zu Wetter- und Klimavorhersagen. Simulationen in diesem dritten Sinn dienen hier als Prognoseinstrument.

Auch wenn in der Anwendung von Computersimulationen durch Forscher, Entwickler oder Anwender mit ein- und derselben Computersimulation u. U. verschiedene Ziele verfolgt werden – etwa vermischen sich in der ingenieurwissenschaftlichen Praxis oftmals Typ-II- und Typ-III-Simulationen – so ist es doch für die epistemische Untersuchung ratsam, die verschiedenen erkenntnistheoretischen Ziele klar zu trennen (vgl. Hillerbrand 2010, 2012).

### 3 Computersimulationen als Gedankenexperimente?

Die Suche nach Singularitäten in der drei-dimensionalen inkompressiblen Euler-Gleichung gibt ein recht finsternes Bild von der erkenntnistheoretischen Leistung von Typ-I-Simulationen (vgl. Abb. 1): Basierend auf den jeweiligen Simulationsergebnissen, bejahten oder verneinten die entsprechenden Publikationen die Frage nach der Existenz von derartigen Singularitäten im Wechsel im Laufe der vergangenen Jahre. Mit wachsender Rechnerleistung verschwanden bereits gefunden geglaubte Singularitäten, oder es tauchten neue Singularitäten auf. Die Antwort der Numerik auf die Frage nach Singularitäten ist abhängig von der numerischen Auflösung; als analytische Differentialgleichung hat die Euler-Gleichung allerdings entweder Singularitäten oder sie hat keine.<sup>1</sup> Typ-I-Simulationen scheinen daher nur sehr begrenzt einen guten Ersatz für analytisches Verständnis zu liefern. Uriel Frisch fordert daher für diese Arte der Simulationen: „Numerics must only be half a step ahead of theory.“<sup>2</sup>

Bei Frischs Zitat handelt es sich allerdings um eine methodische Anweisung, die über die Frage nach dem epistemischen Status von Computersimulationen keine Auskunft gibt. Bezüglich der Frage nach einem möglichen Erkenntnisgewinn, den solche Typ-I-Simulationen mit sich bringen können bzw. sollen, schlagen Di Paolo (2000) und Bedau (1999) vor, Simulationen als Gedankenexperimente zu betrachten. In einem Gedankenexperiment im herkömmlichen Sinn wird eine Situation konstruiert, die real nicht oder zumindest sehr schwer herzustellen ist (zum Beispiel eine Reise mit annähernd Lichtgeschwindigkeit). Im Geiste malt sich der Forscher die Folgen aus, wenn man die Theorie auf die Situation anwendet. Gewissermaßen wird so ein Experiment in Gedanken simuliert. Klassische Beispiele für Gedankenexperimente sind Maxwells Dämon, das EPR-Paradoxon in der Quantenmechanik und das Zwillingsparadoxon in der Speziellen Relativitätstheorie.

Der erkenntnistheoretische Gewinn eines Gedankenexperiments besteht dabei darin, Implikationen aus einer Theorie zu ziehen, die (i) mögliche Widersprüche derselben aufzeigen (wie dies vermeintlich das Gedankenexperiment von Einstein, Podolski und Rosen tat, welches auf das sog. EPR-Paradoxon führte) oder (ii) logische Folgerungen der Theorie aufzeigen, die u. U. kontraintuitiv anmuten. Ein Beispiel hierfür ist die Vorhersage des Poisson-Flecks, der sich als logische Implikation aus der Wellenoptik ergibt. Die Existenz dieses Flecks, ein lichter Fleck in der Mitte des Schattens eines kreisförmigen lichtundurchlässigen Objekts in einem Strahlengang, wurde von S.D. Poisson theoretisch vorhergesagt und schließlich von D.F.J. Arago experimentell

---

<sup>1</sup> Denkbar ist allerdings auch, dass es eine kritische Auflösung gibt, oberhalb derer sich diese Probleme nicht ergeben und diese Auflösung muss theoretisch, soll heißen analytisch, bestimmbar sein.

<sup>2</sup> In Anlehnung an Lenins bekanntes Zitat „The party must be one step ahead, and one step only.“

nachgewiesen. Dieses paradox anmutende Ergebnis eines Gedankenexperimentes trug, nachdem es experimentell bestätigt wurde, zum raschen Siegeszug der Wellenoptik gegenüber der Teilchentheorie des Lichtes bei.

Computersimulationen als Gedankenexperimente zu begreifen, impliziert, Simulationen mit rein deduktiver, nicht-empirischer Erforschung theoretischer Möglichkeiten gleichzusetzen. Ein Gedankenexperiment ist schließlich kein Experiment im eigentlichen Sinne: Die Theorie wird hier nicht durch empirische Anschauung quasi von außen beleuchtet, sondern ein Gedankenexperiment bleibt innerhalb der Theorie gefangen; der empirische Aspekt fehlt. Für Simulationen von Typ II und III gilt dies sicherlich nicht, aber für Typ-I-Simulationen zumindest dem ersten Anschein nach. Aber ist diese Einschätzung haltbar?

Gedankenexperimente waren ein beliebtes Instrument in der Aristotelischen Physik. Spätestens mit Bacon und Galilei wurden sie zunehmend durch systematische (Labor-)Experimente ersetzt. Wenn Gedankenexperimente in der modernen Physik heute dennoch Verwendung finden, so deswegen weil sie sich durch Klarheit auszeichnen. Klarheit und Einfachheit scheinen kennzeichnende Werte von Gedankenexperimenten in der modernen Physik zu sein. Simulationen hingegen, so die Behauptung, genügen nicht diesen epistemischen Werten. Simulationen sind im Allgemeinen weder einfach durchschaubar, noch durch Einfachheit gekennzeichnet – selbst wenn diese Werte durchaus auf das implementierte Modell zutreffen können. Computersimulationen werden letztendlich genau dort eingesetzt, wo unser analytisches Denken an seine Grenzen stößt. Simulationsergebnisse, auch die vom Typ I, haben somit oftmals den Beigeschmack des Experimentierens und – wie die Geschichte der Suche nach *finite-time*-Singularitäten der Euler-Gleichung zeigte – das Potential für Überraschungen. Darüber hinaus lassen sich die für die numerische Implementierung nötigen Zusatzannahmen (etwa zur Diskretisierung) nicht einfach von den Hypothesen der Theorie abspalten. Simulationen sind folglich keine Gedankenexperimente in dem Sinne, wie sie die moderne Physik kennt. In ihrem erkenntnistheoretischen Anspruch können sie damit weder analytische Schlussfolgerungen ersetzen, noch sind sie ihnen epistemisch gleichwertig. Dennoch können Typ-I-Simulationen von großem Nutzen sein. Im Fall der Euler-Gleichung etwa vermögen sie wichtige Hinweise für die analytische Suche nach Singularitäten geben. Stephen Wilson fasst diese zentrale Aufgabe von Typ-I-Simulationen folgendermaßen zusammen (2003, 302): „To make progress one needs radical theoretical ideas, as well as new ways of doing mathematics with computers [...]”.

## 4 Verifikation und Validation

Oreskes, Shrader-Frechette und Belitz kritisieren an Computersimulationen, dass ihnen jeglicher empirischer Gehalt fehle (Oreskes et al. 1994). Dies mag für einige der Typ-I-Simulationen zutreffen, aber pauschal gegenüber Simulationen ist der Vorwurf sicher-



lich nicht haltbar und greift kaum für die anderen Arten der Simulation. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass der fehlende empirische Gehalt bei Typ-I-Simulationen einen gewissen methodischen Vorteil mit sich bringt: Man kann auf die Verifikation der Simulation alleine fokussieren, Probleme der Validation können vollständig ausgeklammert werden. Dabei werden die Begriffe Verifikation und Validation in der Literatur, trotz ihrer zentralen Bedeutung in den numerischen Wissenschaften, unterschiedlich verwendet. In Anlehnung an einen gängigen Sprachgebrauch, bezeichnet in der vorliegenden Publikation der Begriff der Verifikation das Überprüfen, ob die Simulation die zugrunde gelegte Theorie korrekt wiedergibt. Vorgänge wie *Debugging* oder Konsistenzprüfungen fallen hierunter und sind von der Validation der Simulation zu unterscheiden. Bei letzterer geht es darum, zu überprüfen wie gut die Simulation das Targetsystem, dessen Verhalten sie eigentlich vorhersagen soll, überhaupt repräsentiert. Man möchte etwa wissen, wie verlässlich die prognostizierten mechanischen Spannungen in den Bauwerken in Folge der Umströmungen von Deichen und anderen Bauten sind; oder man möchte genau abschätzen, wie die simulierte Clusterbildung einer Suspension von trägen Teilchen von dem Verhalten der realer Suspension abweicht.

Nicht nur sind Verifikation und Validation zentrale Begriffe in allen Bereichen numerischer Wissenschaft, auch geben die Möglichkeiten und Grenzen der Verifikation bzw. Validation Aufschluss über den epistemischen Gehalt von Computersimulationen. Zunächst soll hier die Verifikation eingehender betrachtet werden. Der Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und analytischen Ergebnissen ist ein wichtiger Schritt in der Entwicklung des numerischen Codes. Die Übereinstimmung zwischen diesen in einem bestimmten Parameterbereich sagt aber nichts über das Verhältnis zwischen beiden außerhalb dieses Parameterbereiches aus. Der Sinn numerischer Simulation besteht allerdings gerade darin, über analytische Aussagen hinaus zugehen. Die Übereinstimmung zwischen analytischen und numerischen Ergebnissen sollte daher besser als *bench-marking* bezeichnet werden denn als Verifikation.

Der Gebrauch des Begriffs Verifikation ist auch deswegen problematisch, weil er nur allzu leicht den Eindruck erweckt, dass es sich bei den Simulationsergebnissen um wahre Propositionen im logischen Sinne handelt – etwa derart, dass der Schluss "Wenn  $p$ , dann  $q$ " verifiziert ist. Dies ist aber selbst bei Typ-I-Simulationen nicht möglich. Zum einen darf der Schluss „Wenn  $p$ , dann  $q$ “ um verifizierbar zu sein, keine impliziten *ceteris paribus* Bedingungen beinhalten. Für die Simulation heißt dies, dass das Modell, das implementiert wird, ein geschlossenes System sein muss. Dies gilt zwar für die mathematischen Komponenten der Theorie, die implementiert werden: Diese lassen sich verifizieren, weil ihr Wahrheitsgehalt sich aus der Bedeutung der verwendeten mathematischen Symbole ergibt (z. B. Ayer 1946). Bei der numerischen Implementierung ist man indes auf Inputparameter angewiesen, die nicht genau bekannt sind; das numerisch implementierte System ist damit nicht geschlossen (Oreskes et al. 1994). Zum anderen ergeben sich bei probabilistischen Aussagen – und solche erwartet man oftmals von Computersimulationen gerade in der Strömungsmechanik – auch dann



Probleme, wenn es sich um geschlossene Systeme handeln würde. Probabilistische Schlüsse sind im Gegensatz zu deterministischen nicht-monoton, d. h. durch Hinzunahme weiterer wahrer Antezedens-Bedingungen kann ein wahrer Schluss falsch werden. Anders ausgedrückt: Die Konklusion ist bei probabilistischen Schlüssen nicht von den Prämissen abspaltbar (Schurz 2001, Hempel 1965, 400).

Wesentliche Probleme bei der Validation, d. h. beim Abgleich zwischen der Computersimulation und dem zu simulierenden Targetsystem, ergeben sich aus der holistischen Geschlossenheit, mit der verschiedene Modellannahmen ihre individuelle Prüfung verweigern. Selbst wenn sich eine Deichbruchsimulation im Nachhinein als falsch herausstellen sollte, was ist damit genau falsifiziert? Die Parameterwahl, der Diskretisierungsalgorithmus oder tatsächlich das zugrunde liegende Modell? Ein wirklicher Erkenntnisgewinn wäre es letztendlich nur, wenn man wüsste, dass das zugrunde gelegte Modell tatsächlich die relevanten Kausalmechanismen im Targetsystem nicht zu repräsentieren vermag. Aber wir können die eigentliche Theorie mit ihren Hypothesen nicht von den vielen Hilfsannahmen trennen, von denen ihre numerische Implementierung Gebrauch macht (vgl. Lenhard/Winsberg 2008).

Hinzu kommt ein weiteres Problem, das Wissenschaftsphilosophen als Unterdeterminiertheit und Wissenschaftler gerne als Nichteindeutigkeit oder *nonuniqueness* bezeichnen: Übereinstimmung mit der Beobachtung sagt nicht unbedingt etwas über die Korrektheit der Beschreibung aus – mit Hilfe geozentrischer Weltbilder konnten über Jahrhunderte hinweg viele astronomische Phänomene gut vorhergesagt werden. In der ingenieurwissenschaftlichen Hydrodynamik etwa sind Large-Eddy-Simulation oder die Schließungsansätze wie die des  $k-\varepsilon$ -Modells ja genau so gewählt, dass sie den (bekannten) empirischen Beobachtungen entsprechen. Wir fordern von guten wissenschaftlichen Erklärungen im Allgemeinen weit mehr als nur empirische Adäquatheit. Oft wird hier auf sog. epistemische Werte verwiesen, die sich in der Einfachheit oder Schönheit der theoretischen Beschreibung widerspiegeln (sollen). Aber um die herkömmlichen epistemischen Werte wie Einfachheit, Klarheit oder Ästhetik scheint es bei Computersimulationen schlecht bestellt.

## 5 Eine neue Wissenschaftstheorie der Simulation?

Viele Wissenschaftstheoretiker fordern daher eine neue Wissenschaftstheorie der Simulation (z. B. Humphreys 2009, Winsberg 2009): Nicht nur, was unstrittig ist, erfordern Computersimulationen eine neue Methode, sondern auch eine genuin neue Epistemologie. Jedoch zumindest die Probleme, die wir bei der Validation von Simulationen kennen gelernt haben, sind nicht neu. So verwies insbesondere Pierre Duhem bereits an der Wende des 19. zum 20. Jahrhundert auf die Unterdeterminiertheit der theoretischen Beschreibung durch die Beobachtung. Und die Kritik an der rigiden Methode der Verifikation greift auch für analytische Beschreibungen der Realität wie uns etwas schon Popper (2005) lehrte. So konstatieren etwa Roman Frigg und Julian Reiss, dass es sich

bei den vermeintlich neuen epistemischen Problemen, vor die uns Computersimulationen stellen, um alt bekannte philosophische Probleme handelt (Frigg/Reiss 2009).

Allerdings scheint es auch so, dass sich diese altbekannten Probleme – die letztendlich alle um das Problem kreisen, was denn eine gute wissenschaftliche Erklärung als solche genau auszeichnet – hier nicht nur verschärft auftreten. Computersimulationen haben sich als neues Erkenntnisinstrument in den Wissenschaften durchgesetzt: Neben der theoretischen und experimentellen Erforschung turbulenter Strömungen steht die numerische Untersuchung derselben als weitgehend gleichberechtigter Zweig. Die Kritik, welche heute sowohl aus philosophischer als auch aus wissenschaftlich-mathematischer Perspektive an Computersimulationen erhoben wird, ist sicherlich in Teilen berechtigt. Allerdings erinnert sie in weiten Teilen an die Kritik, die an der experimentellen Methode eines Galilei oder Bacon zu Beginn der Neuzeit erhoben wurde (Heidelberger 2007). Auch diese Kritik war (zumindest in Teilen) berechtigt: Kritiker verwiesen damals vor allem auf zwei Punkte: Zum einen sind Experimente nicht Allen zugänglich; sie können im Gegensatz zu einfachen Beobachtungen nicht ohne weiteres von jedem einfach reproduziert werden. Zum anderen ist nicht ohne weiteres klar, ob das gezielte Eingreifen in die Natur durch das systematische Experimente die Natur nicht eher stört, denn dass sie sich in ihrer Eigenart zu erkennen gibt. All diese Kritikpunkte formulierten berechtigte epistemische Zweifel an systematischen Experimenten – verhinderten aber zum Glück nicht die Etablierung der experimentellen Methode in der wissenschaftlichen Praxis. Berechtigte epistemische Zweifel an Computersimulationen als dritter Methode in den Wissenschaften neben Theorie und Experiment scheinen auch heute angebracht und werden von vielen Fachwissenschaftlern erhoben. Die wissenschaftstheoretische Reflexion muss diesem Sachverhalt Rechnung tragen. Die Philosophie des Experimentes begann, von wenigen Ausnahmen abgesehen, mit Ian Hacking und seinem Neuen Experimentalismus (*New Experimentalism*) in den 80er Jahren, und damit fast 400 Jahre nachdem sich die experimentelle Methode durchzusetzen begann. Die in den letzten Jahren stark gestiegen Zahl an wissenschaftstheoretischen Veröffentlichungen zur Rolle von Simulationen in den Wissenschaften lässt hoffen, dass eine systematische philosophische Auseinandersetzung mit dem Thema nicht so lange warten lässt wie die wissenschaftlichere Reflexion über die Rolle des Experiments in den Wissenschaften.

## 6 Literatur

Ayer, A.J. (1946): *Language, Truth, and Logic*, Dover: New York

Bedau M.A. (1999): *Can Unrealistic Computer Models Illuminate Theoretical Biology?*  
In: *Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program* / Hrsg. A. Wu. Orlando: GECCO, pp 20-23

- Di Paolo, E., Noble, J. & Bullock, S. (2000): Simulation models as opaque thoughtexperiments, *ALife VII*
- Frigg, R. & Reiss, J. (2009): The Philosophy of Simulation: Hot New Issues or Same Old Stew? *Synthese* 169(3)
- Hacking, I. (1983): *Representing and Intervening*, Cambridge University Press: Cambridge
- Hartmann, S. (1996): The World as a Process. In: *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View* /Hrsg. R. Hegselmann u.a. Dordrecht, pp 77–100
- Heidelberger, M. (2007), *Das Experiment in den Wissenschaften*. In: *Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch* /Hrsg. A. Bartels & M. Stöckler, Mentis: Paderborn, pp155-176
- Hempel, C.G. (1965): *Aspects of Scientific Explanation (and other Essays)*, New York: Free Press
- Hillerbrand, R., Hofstetter, K., Holz, O., Székelyhidi, L., Springel, V. (2010): *Simulierte Wissenschaft oder Erkenntniswerkzeug? Computersimulation aus fünf Perspektiven*, *Junge Akademie-Magazin*, 1/2010
- Hillerbrand, R. (2012): *Order out of Chaos? A Case Study in High Energy Physics*. In: *Studia Philosophica Estonica*, in press
- Humphreys, P. (2009): "The Philosophical Novelty of Computer Simulation Methods". *Synthese* 169(3)
- Lenhard, J. & Winsberg, E. (2008): *Holism and Entrenchment in Climate Model Validation*, unpublished draft: <http://www.cas.usf.edu/ewinsb/Holism.pdf>
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K. (1994): Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Science. *Science* 263, pp 641–646
- Popper, K. (2005), *Logik der Forschung*, Mohr Siebeck: Tübingen
- Rettemeier, K., Bergen, O., Van Linn, A. & Köngeter, J. (2001): *Numerical Modeling of Turbulence in Lakes and Reservoirs with Large Eddy Simulation Technique 21st Century: The New Era for Hydraulic Research and Its Applications: XXIX IAHR Congress, September 16-21, 2001, Beijing, China. Theme B: Environmental Hydraulics and Eco-Hydraulics*. Beijing, China: Tsinghua University Press, pp 545-552 - ISBN 7-302-04676-X
- Roger, S., Dewals, B. J., Erpicum, S., Schwanenberg, D., Schüttrumpf, H. Köngeter, J. & Piroton, M. (2008): Experimental and numerical investigations of dike-break induced flows. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 3, pp. 349-359. - ISSN 0022-1686; doi: 10.3826/jhr.2009.3472

- J. Schumacher, M. S. Emran, B. Eckhardt (2008): The Fine-Scale Structure of Turbulence. In: NIC Symposium 2008/ Hrg. G. Münster, D. Wolf, M. Kremer, John von Neumann Institute for Computing: Jülich. NIC Series, Vol. 39, pp 341-348, ISBN 978-3-9810843-5-1
- Schurz, G. (2001): "Normische Gesetzhypothesen und die wissenschaftsphilosophische Bedeutung des nichtmonotonen Schließens", in: Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie 32, pp 65–147
- Schwanberg, D. & Harms, M. (2004): Discontinuous Galerkin Finite-Element Method for Transcritical Two-Dimensional Shallow Water Flows. Journal of Hydraulic Engineering, 130(5). ASCE, ISSN 0733-9429/2004/5-1-10
- Wilson, S. (2003): Information Arts: Intersections of Art, Science, and Technology. MIT-Press: Leonardo Books. ISBN-10: 0-262-73158-4, ISBN-13:978-0-262-73158-4
- Winsberg, E. (2009): A Tale of two Models. Synthese 169(3), 575–592

### **Anschrift der Verfasserin**

Prof. Dr. rer. nat. Dr. phil. Rafaela Hillerbrand  
Human Technology Centre, RWTH Aachen University  
Theaterplatz 14  
52056 Aachen