

# »Das Wissen mit eigenen Worten wiedergeben«

Ein Wissenschaftsgespräch mit GÜNTHER LANG

Dr. Günther Lang ist Wissenschaftler bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Hamburg. Er ist Spezialist für hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) von Ästuaren. Im Interview schlägt er den Bogen von Albert Einstein bis Richard Feynman. Seine Antworten sind gespickt mit zahlreichen wunderbar anschaulichen Beispielen.

HN-Modelle | Wasserstandsvorhersage | Ästuar | Berechnungsgitter | Datenassimilation | Randwerte  
HN models | water level prediction | estuary | computational grid | data assimilation | boundary values

Dr. Günther Lang is a scientist at the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) in Hamburg. He is a specialist in hydrodynamic-numerical models (HN models) of estuaries. In the interview, he covers a wide range of topics from Albert Einstein to Richard Feynman. His answers are peppered with numerous wonderfully illustrative examples.

## Interviewer

Das Interview mit Günther Lang fand im Januar per E-Mail statt. Die Fragen stellten Lars Schiller und Christian Maushake.

Textbearbeitung: Lars Schiller

Viele Mitbürger dürften nicht ahnen, welche Bedeutung numerische Modelle in ihrem Alltag haben. Dabei nutzt man dieses mathematische Werkzeug zum Studium von realen Vorgängen in der Natur. Zum Beispiel für Wettervorhersagen. Und auch jetzt in der Corona-Pandemie schlägt die Stunde der Modellierer, um herauszufinden, durch welche Maßnahmen die Fallzahlen sinken könnten. Welche Beispiele aus dem alltäglichen Leben gibt es noch?

Für die Menschen an den deutschen Küsten sind das zum Beispiel die täglichen Wasserstandsvorhersagen des BSH: »Am Sonnabend werden das Abend-Hochwasser an der deutschen Nordseeküste und in Emden sowie das Nacht-Hochwasser in Bremen und Hamburg 1 bis 3 Dezimeter niedriger als das mittlere Hochwasser eintreten.« In dieser Form werden die Ergebnisse komplexer Modelle in einfacher, allgemein verständlicher Weise täglich vom BSH veröffentlicht.

Des Weiteren fallen mir Verkehrsleitsysteme ein, die auf Basis von Beobachtungen (Anzahl und Geschwindigkeit der Fahrzeuge) in Kombination mit Modellen des Verkehrsnetzes abschnittsweise die maximal erlaubte Geschwindigkeit regulieren oder Verkehrsteilnehmer auf Ausweichstrecken umleiten, um lokale Staus zu vermeiden.

Schließlich denke man an den vielleicht nicht ganz alltäglichen Nachweis von Gravitationswellen. Vor mehr als 100 Jahren prognostiziert, erst vor wenigen Jahren nachgewiesen. Die Signale konnten nur gefunden und verstanden werden, weil Vorhersagen den Wissenschaftlern verrietten, wonach gesucht werden musste. Die Vorhersagen stammen von Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen, die allerdings so kompliziert sind, dass die Kollision der Schwarzen Löcher und somit

die Erzeugung der Gravitationswellen nur mit Hilfe aufwendiger Simulationen auf Großrechnern erzeugt werden konnten. Eine spektakuläre Anwendung numerischer Verfahren.

Die BAW in Hamburg betreibt große und hydrodynamisch-numerische Modelle der deutschen Küstengewässer und Ästuare. Für welche Fragestellungen werden die Modelle eingesetzt?

HN-Modelle werden eingesetzt, um die verschiedenen Systeme (Ems, Jade, Weser, Elbe usw.) besser verstehen zu lernen, indem wir zum Beispiel aus den Simulationsergebnissen charakteristische Kennwerte (Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub etc.) ableiten. Auf Basis dieser Kennzahlen können die Systeme verglichen und somit Unterschiede und Gemeinsamkeiten beschrieben und quantifiziert werden.

Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Prognose natürlicher und anthropogener Einflüsse auf die Dynamik der untersuchten Systeme. Da geht es um den Einfluss der Nodaltide (eine astronomische Gezeit mit einer Periode von circa 18,6 Jahren), um ausbaubedingte Änderungen oder um den Meeresspiegelanstieg und seine Auswirkungen auf die Tidedynamik. Hierfür werden Simulationsergebnisse für den aktuellen Zustand und zukünftige Zustände miteinander verglichen. Unterschiede werden üblicherweise in Form von Änderungen der genannten Kennwerte dargestellt.

Welcher Unterschied besteht zwischen einem Ästuarmodell und beispielsweise einem numerischen Modell zur Umströmung von Fahrzeugen, wie es in der Automobilindustrie eingesetzt wird?

Zum einen sind es die untersuchten räumlichen Skalen. Ein Pkw ist typischerweise 5 Meter lang, 2 Meter breit und 1,5 Meter hoch. Das untersuchte Objekt, also der Pkw, weist in allen Raumrichtungen

gen dieselben Abmessungen auf. Ästuare sind demgegenüber ziemlich flach, zum Beispiel circa 100 Kilometer lang, 3 Kilometer breit und 10 bis 20 Meter tief. Die Abmessungen in den verschiedenen Raumrichtungen sind also äußerst verschieden. Ein Ästuar ist circa 10 000-mal länger als tief, während beim Pkw Länge und Höhe von gleicher Größenordnung sind. Das hat Auswirkungen auf die relevanten physikalischen Prozesse. So kann in Ästuaren die vertikale Beschleunigung des Wassers häufig vernachlässigt werden, da sie sehr klein gegenüber der Schwerebeschleunigung ist. Beim Pkw geht das in keinem Fall.

Zum anderen sind die Zeitskalen der relevanten physikalischen Prozesse sehr verschieden. Im Ästuar ist es die halbtägige Tideperiode mit einer mittleren Dauer von 12 Stunden und 25 Minuten, während es beim Pkw hochfrequente turbulente Bewegungen mit Perioden deutlich kleiner als 1 Sekunde sind.

Allerdings können Ästuare teilweise trockenfallen: Wattgebiete sind über mehrere Stunden einer Tide in der Regel wasserfrei. Demgegenüber wird ein Pkw permanent von Luft umströmt. Nirgendwo an seiner Oberfläche kann ein Vakuum auftreten. Ein Ästuarmodell muss also mit einem zeitlich veränderlichen Lösungsgebiet umgehen können, für das die grundlegenden Gleichungen in jedem Zeitschritt gelöst werden müssen.

Das Wasser in einem Ästuar kann sich in seiner Dichte von Ort zu Ort um mehrere Prozent unterscheiden. Verursacht wird dies primär durch Unterschiede im Salzgehalt (Süß- und Salzwasser mischen sich im Ästuar – wir haben es mit einer Brackwasserzone zu tun). Sekundär durch Temperaturunterschiede oder den Gehalt an Schwebstoffen. Diese Differenzen führen zu Druckdifferenzen, die ihrerseits wieder auf die Dynamik zurückwirken (zum Beispiel barokline Zirkulation). Diese Einflüsse spielen bei der Umströmung eines Pkw sehr wahrscheinlich keine entscheidende Rolle.

Obwohl für beide Anwendungsgebiete die Navier-Stokes-Gleichungen eine gemeinsame Grundlage sind, stellen die oben skizzierten Differenzen unterschiedliche Anforderungen an die benutzten numerischen Methoden im Hinblick auf zweckmäßige Näherungen (Vereinfachung der grundlegenden Gleichungen), Parametrisierungen sowie die Diskretisierung der Terme.

[Worauf kommt es bei der Ästuarmodellierung an?](#)

An erster Stelle ist die genaue Kenntnis der Bathymetrie des Ästuars zu nennen. Diese bestimmt in Abhängigkeit vom Wasserstand die durchströmten Querschnitte und das Wasservolumen. Beides ist von entscheidender Bedeutung für die Hydrodynamik des Ästuars. Aus diesem Grunde benutzen wir eine sogenannte sub-gridskalige Bathymetrie in unseren numerischen Modellen, mit deren Hilfe die gemessene Bathymetrie mit hoher Präzision berücksichtigt werden kann,



Dr. Günther Lang

und zwar unabhängig von der Auflösung des Berechnungsgitters (für jede Zelle oder Kante des Berechnungsgitters ist die Tiefenverteilung bekannt).

An zweiter Stelle stehen die Randwerte, zum Beispiel Wasserstand, Salzgehalt, Seegang entlang des seeseitigen Randes und der Abfluss aus dem Binnenland. Für Sturmflut Szenarien werden außerdem insbesondere Windgeschwindigkeit und Luftdruck über dem gesamten Modellgebiet benötigt. Die zuletzt angeführten Daten erhalten wir zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst (DWD).

»Die genaue Kenntnis der Bathymetrie ist essenziell für gute Simulationsergebnisse, da Volumen und Querschnitt maßgeblichen Einfluss auf den berechneten Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit haben«

Dr. Günther Lang

Eine besondere Herausforderung der Ästuarmodellierung stellt das Trockenfallen und Überfluten von Wattgebieten dar, die mit einer kontinuierlichen Veränderung der Größe des Lösungsgebiets einhergehen. Außerdem treten hierbei kurzfristig jeweils sehr geringe Wassertiefen auf, mit

denen das HN-Verfahren zuverlässig klarkommen muss, um zum Beispiel negative Wasserbedeckungen zu vermeiden.

Für Wettervorhersagen benötigen Meteorologen wichtige Eingangsdaten, die aus direkten Naturbeobachtungen kommen. Diese Daten werden normalerweise auch von Flugzeugen eingesammelt. Weil gerade viel weniger Flugzeuge in der Luft sind, sind die Vorhersagen weniger verlässlich. Welche Bedeutung haben Qualität und Quantität der Eingangsdaten?

Mit Bezug auf die Anfangsbedingungen sind unsere Anforderungen in der Regel weniger fordernd als die der Meteorologen, die jeden Tag das Wetter für die nächsten Tage prognostizieren müssen. Bei ihnen ist die Güte des Anfangszustands eine ganz entscheidende Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Prognose des Wettergeschehens. Für die Einarbeitung der Anfangswerte in das meteorologische Modell betreiben die zuständigen Institutionen wie DWD und ECMWF einen sehr hohen Aufwand bei der Datenassimilation, die ja auch zu einem physikalisch konsistenten Anfangszustand führen muss.

In unseren HN-Modellen benutzen wird häufig als Anfangszustand das Ergebnis einer vorangehenden Modellrechnung oder die Berechnungsergebnisse eines großräumigen Modells, zum Beispiel einem HN-Modell der Nordsee, dessen Ergebnisse für ein HN-Modell der Elbe benutzt werden. Dessen Bedeutung ist allerdings geringer als bei Wettervorhersagemodellen, da wir sehr viel längere Simulationszeiträume als bei einer Wettervorhersage rechnen. So simulieren wir häufig mehrere Monate oder ein ganzes Jahr. Dabei unterteilt sich die Simulation in eine Anfangsphase,

in der Störungen aus dem Anfangszustand allmählich gegen null abklingen, und eine daran anschließende Analysephase, die dann weitestgehend unbeeinflusst vom Anfangszustand ist und aus deren Ergebnissen die uns interessierenden Aussagen abgeleitet werden. Die Dauer der Abklingphase hängt dabei von der räumlichen Ausdehnung des Modells sowie von den Untersuchungsgrößen ab. Für Wasserstand und Strömung ist die Abklingzeit am kürzesten, für den Salzgehalt länger und für Sedimente am längsten.

Bei den Randwerten ist es dann in gewisser Weise genau andersherum. Die globalen meteorologischen Modelle benötigen, insofern sie mit Ozean- und Bodenmodellen gekoppelt sind, »nur« noch die Sonneneinstrahlung am oberen Rand der Atmosphäre, die aber sehr genau bekannt sind. Da wir keine globalen HN-Modelle betreiben – ein Ästuar ist ja nur ein sehr, sehr kleiner Ausschnitt aus der großen weiten Welt –, benötigen wir sehr gute Randwerte, insbesondere an den seeseitigen Rändern unserer Modellgebiete.

Allgemein gilt: Eine gute Qualität der Eingangsdaten ist neben der Qualität des HN-Verfahrens die entscheidende Voraussetzung für qualitativ hochwertige, verlässliche Simulationsergebnisse. Kein Modell der Welt kann auf Basis schlechter Anfangs- oder Randwerte exzellente Ergebnisse produzieren.

Welche Eingangsdaten kann die Hydrographie für hydrodynamisch-numerische Modelle beisteuern? Welche Rolle spielen dabei Bathymetriedaten?

Wie schon zuvor erläutert, ist die genaue Kenntnis der Bathymetrie essenziell für gute Simulationsergebnisse, da Volumen und Querschnitt maßgeblichen Einfluss auf den berechneten Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit haben. Bathymetrische Daten sollten eine hinreichende räumliche Auflösung besitzen, zum Beispiel 1 Meter. Auf etwas größeren Skalen, zum Beispiel 10 Meter, sollten sie außerdem frei von systematischen Fehlern sein (Volumenfehler). Darüber hinaus sollten für dasselbe Gebiet bathymetrische Messungen für das gesamte Modellgebiet, also nicht nur für den Bereich der Schifffahrtsrinne, in regelmäßigen Abständen wiederholt werden. Da manche Bereiche der Ästuarie hinsichtlich ihrer morphologischen Entwicklung sehr dynamisch sind, wäre eine zeitliche Auflösung von einem Jahr aus wissenschaftlicher Sicht wünschenswert.

Darüber hinaus besteht ein Mangel an Langzeitmessungen an festen Positionen, insbesondere in Bezug auf die Größen Strömungsgeschwindigkeit, Salzgehalt, Temperatur und Schwebstoffgehalt. Dies ist von Relevanz mit Blick auf klimabedingte langsame Langzeitänderungen. Man stelle sich vor, es stünden heute keine der über viele Jahrzehnte (teilweise bis über 200 Jahre) zurückreichenden Messungen der Lufttemperatur zur Verfügung. Oder es gäbe keine seit 1958 durchgeführten CO<sub>2</sub>-

Messungen. Manche Veränderungen wären dann nicht oder nur mit sehr viel kleinerer statistischer Signifikanz nachweisbar.

Eine gute Idee wäre es auch, alle größeren Schiffe – ähnlich wie Flugzeuge – regelmäßig hydrologische Daten erfassen und automatisch übermitteln zu lassen.

[Wie lässt sich die Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße simulieren?](#)

Das Problem ist vergleichbar damit, einen Pkw in ein meteorologisches Modell einzubetten und die Wechselwirkung zwischen Pkw und der ihn umgebenden Luftströmung korrekt zu berücksichtigen.

Für die Kombination Schiff und Wasserstraße fallen ebenfalls sofort die unterschiedlichen Skalen auf: Am Schiff, mit einer Länge von 100 bis 400 Meter und einer Breite von 30 bis 60 Meter, benötigen wir eine hoch aufgelöste Beschreibung der Strömungs- und Druckverhältnisse. Dies ist erforderlich, um einerseits die auf das Schiff einwirkenden Kräfte korrekt beschreiben zu können und andererseits die Rückwirkung auf die Hydrodynamik im Nahbereich des Schiffs (Verdrängung, Erzeugung von Primär- und Sekundärwellen usw.). Ferner muss die Bewegung des Schiffskörpers mit seinen sechs Freiheitsgraden (das ist jetzt etwas vereinfacht, ohne die Betrachtung elastischer Deformationen) und den dazugehörigen Trägheitsmomenten unter Einwirkung der angreifenden Druckkräfte korrekt wiedergegeben werden – das Schwimmen des Schiffs in einer stets sich ändernden Lage ist selbst eine Lösung des Problems. Das Schiff und die kleinräumigen hydrodynamischen Effekte müssen dann in ein großräumiges Ästuarmodell eingebettet werden, welches eine typische Länge von 100 Kilometer aufweist. Das Gesamtmodell muss also sowohl im Nahbereich des Schiffs nicht-hydrostatisch funktionieren als auch in der Lage sein, die vom Schiff ausgehenden kurzen Wellen (die viel kürzer sind als die Tidewelle) über einen gewissen Bereich wiederzugeben. Und schließlich bewegt sich das Schiff mit einer Geschwindigkeit von 10 bis 20 km/h vorwärts. Das Problem ist damit deutlich anspruchsvoller als die Situation eines Pkw in einem Windkanal oder eines Schiffs in einem Kanal mit konstantem Querschnitt, da sich im Ästuar das geometrische Umfeld (Bathymetrie) in jeder Sekunde ein wenig verändert. Das Gesamtpaket (volle Wechselwirkung) ist derzeit meines Wissens noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Ich verfüge auf diesem Gebiet allerdings über keine eigene Expertise.

[Wie spielen Sie durch, welche Auswirkungen die nächste Fahrrinnenvertiefung auf die Elbe hat?](#)

In einem ersten Schritt erfolgt die Festlegung des Modellgebiets sowie der Simulationszeiträume für Kalibrierung und Validierung. Dabei ist darauf zu achten, dass das Modellgebiet groß genug gewählt wird, sodass die Auswirkungen der geplanten Maßnahme an dessen seeseitigen Rändern

gegen null tendieren. Bei den Simulationszeiträumen ist zu beachten, dass sie alle für das System relevanten »Anregungen« enthalten, zum Beispiel Sturmfluten oder sehr hohe und sehr niedrige Abflüsse aus dem Binnenland.

Danach wird das Modellgitter erstellt und die Bathymetrie für den planerischen Ist-Zustand darauf abgebildet. Eventuell vorhandene Strombauwerke werden bestmöglich berücksichtigt. Mit diesem Modellgitter wird das HN-Modell für einen bestimmten Simulationszeitraum kalibriert und für einen oder mehrere davon abweichende Simulationszeiträume validiert. Bei Kalibrierung und Validierung werden die Simulationsergebnisse typischerweise mit Beobachtungsdaten verglichen und zum Beispiel als Taylor-Diagramm dargestellt. Idealerweise sollte die Übereinstimmung für Kalibrierung und Validierung von vergleichbarer Güte sein. Außerdem sollten keine systematischen Abweichungen auftreten.

Schließlich wird eine Kopie des Modellgitters erzeugt und es werden die geplanten Änderungen zum Beispiel der Bathymetrie berücksichtigt (Ausbauzustand). Für ausgewählte Analysezeiträume werden dann Simulationsdaten für den Ist- und den Ausbauzustand erzeugt. Dabei handelt es sich um synoptische Datensätze (Wasserstand, Strömung, Salzgehalt usw.) für das gesamte Modellgebiet und/oder für ausgewählte Profile oder Einzelpositionen. Die synoptischen Daten liegen typischerweise alle 5 bis 10 Minuten vor (der numerische Zeitschritt liegt oft zwischen 10 und 30 Sekunden). Für längere Simulationszeiträume können mehr als 50 000 synoptische Datensätze pro Simulation anfallen.

Um die durch den Ausbau bedingten Änderungen darstellen zu können, werden sowohl für den Ist- als auch den Ausbauzustand charakteristische Kenngrößen (Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub usw.) flächenhaft berechnet und anschließend die jeweiligen Differenzen ermittelt. Auf diesem Wege erhält man für alle im Analysezeitraum vorhandenen Tiden die Veränderung des Tidehochwassers, woraus Maximal-, Minimal-, Mittelwerte oder Perzentile abgeleitet werden können. Mit Hilfe dieser Kennwert-Differenzen können die prognostizierten Auswirkungen verständlich visualisiert und für ausgewählte Positionen in Tabellen zusammengefasst werden. Vergleichbare Auswertungen können für alle relevanten Parameter je nach Bedarf vorgenommen werden.

[Welche Parameter werden denn mit den Modellen bei der BAW simuliert? Welche Rolle spielt zum Beispiel der Salzgehalt?](#)

Neben Wasserstand und Strömung werden insbesondere Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoffgehalt, der Sedimenttransport an der Gewässersohle und die Evolution der Gewässersohle (Morphodynamik) mitberücksichtigt. Bei Bedarf auch der Seegang (spektrales Seegangmodell).

Insbesondere in den seewärts gelegenen Bereichen der Ästuar spielt dieser eine wichtige Rolle.

Da für Ästuar das Vorhandensein einer Brackwasserzone typisch ist, darf der Salzgehalt in keinem Fall vernachlässigt werden (horizontale barokline Dichtegradienten, Beeinflussung der vertikalen Turbulenz durch Dichteschichtung).

#### Was genau ist eine ausbaubedingte Veränderung?

Damit ist zumeist die auf eine Fahrrinnenanpassung der Seeschiffahrtsstraße (Vertiefung, Verlegung, Verbreiterung) zurückzuführende Veränderung der Hydrodynamik sowie der transportierten Stoffe (Salz, Wärme, Schwebstoff usw.) gemeint. Wird zum Beispiel die Gewässersohle um einen bestimmten Betrag tiefergelegt, so erhöht sich die Wassertiefe. Daraus resultiert eine raschere Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle und in der Regel eine Abnahme der Dissipation durch Bodenreibung (pro Volumeneinheit). Dies bedingt stromauf ein früheres Eintreten des Thw/Tnw und zumeist auch eine Zunahme des Thb, der sich aus einem Absink des Tnw und Anstieg des Thw ergibt. Auch das Verhältnis von Flutdauer zu Ebbedauer oder Flutstromdauer zu Ebbestromdauer kann sich verändern. Letzteres hat dann wieder Konsequenzen für den residuellen Transport von Sedimenten.

#### Sind Simulationen leistungsfähiger als Naturversuche?

Ein wesentlicher Vorteil von HN-Modellen besteht darin, dass deren Ergebnisse in sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vorliegen und diese Ergebnisse in sich physikalisch konsistent sind. Vergleichbar wäre dies mit dem Einsatz hunderttausender gleichartiger, kalibrierter Messgeräte oder äquivalenter Methoden der Fernerkundung.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sehr einfach Systemversuche durchgeführt werden können, um die Reaktion des Systems auf eine Veränderung der Randwerte – zum Beispiel seeseitiger Wasserstand, Abfluss, meteorologische Einflüsse – untersuchen zu können.

Grundsätzlich allerdings sollten die verschiedenen Methoden nicht gegeneinander ausgespielt werden: Mit einer geeigneten Kombination theoretischer Überlegungen, gezielter Messkampagnen sowie der Anwendung von HN-Modellen kommen wir weiter als mit jeder Methode für sich alleine genommen. Sie ergänzen sich gegenseitig. Das anfänglich erwähnte Beispiel des Nachweises von Gravitationswellen ist ein sehr schönes Beispiel dafür. In diesem Fall kamen aus der numerischen Simulation entscheidende Hinweise zur Form der Signale, die für derartige Phänomene zu erwarten sind und nach denen deshalb gezielt gesucht werden konnte.

Ich erinnere mich an folgendes Beispiel: Beim Schließen des Ems-Sperrwerks entsteht in der Regel vor dem Sperrwerk eine Schwallwelle, die sich in Richtung Emden ausbreitet und die in der Lage ist, den Dollart zu Eigenschwingungen anzuregen,

die dann am Pegel Emden beobachtet werden können. Dieses Phänomen konnte in unserem Hause mit Hilfe eines HN-Modells reproduziert werden. Dass es sich um Eigenschwingungen des Dollart handeln muss, folgt aber weder direkt aus den Beobachtungen noch aus den Simulationsergebnissen, sondern erst auf Basis theoretischer Überlegungen hinsichtlich der für den Dollart zu erwartenden Eigenfrequenzen.

#### Wie genau und zuverlässig ist Modellierung?

Die bei uns im Einsatz befindlichen HN-Verfahren besitzen einen hohen Grad an Zuverlässigkeit und Robustheit. Offensichtlich fehlerhafte Anwender-Angaben in den Eingangsdaten werden zuverlässig abgefangen (der Anwender erhält entsprechende Fehlermeldungen). Ebenso sind die eingesetzten Algorithmen stabil und robust, sodass Abstürze der Programme glücklicherweise zu einer großen Seltenheit geworden sind. Auf diesem Gebiet konnten in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte erzielt werden.

Schwieriger zu beantworten ist die Frage nach der Genauigkeit, da nicht für alle Variablen zuverlässige Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen. Außerdem ist der Einfluss der Güte der Randwerte (Wasserstand und Salzgehalt auf dem seeseitigen Rand, Abfluss, Wind) nicht vernachlässigbar. Für die Wasserstände, insbesondere Tnw, Thw und Thb, liegen die Differenzen zu Beobachtungsdaten typischerweise bei 0 bis 10 Zentimeter Genauigkeit.

Was wir dagegen sehr gut kontrollieren können, ist die »innere Genauigkeit« der eingesetzten HN-Verfahren: so liegt der Volumenfehler des HN-Modells für das Elbe-Ästuar bei circa 1 Kubikzentimeter in jedem numerischen Zeitschritt. Das heißt, wir wissen, dass unser Verfahren praktisch exakt volumenerhaltend ist.

Darüber hinaus sind wir sehr häufig »nur« an Differenzen zwischen verschiedenen Systemzuständen interessiert, sodass gleichartige Abweichungen in den Einzelergebnissen bei der Differenzbildung herausfallen. Da unsere Modelle den Einfluss bathymetrischer Änderungen auf durchströmte Querschnitte (Strömung), Wasservolumen (Wasserstand), Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle (Eintrittszeiten Thw, Tnw, Asymmetrie der Tidewelle) durch Verwendung einer sub-grid-skaligen Bathymetrie sehr genau darstellen, können deren Folgen für Hydrodynamik und Transport ebenfalls zuverlässig simuliert werden.

#### Was lässt sich nicht simulieren? Wo sind die Grenzen der Simulation?

Solange es einerseits eine mathematisch-physikalische Beschreibung des Problems gibt, zum Beispiel in Form von Differenzialgleichungen und geeigneten Parametrisierungen, und andererseits etablierte numerische Verfahren zur Lösung des Problems bekannt sind, sollten die meisten Probleme »im Prinzip« auch simulierbar sein.

Grenzen ergeben sich einerseits aus dem Bedarf

an CPU-Zeit – hier helfen schnelle Algorithmen, Optimierung, Parallelisierung, leistungsfähige Computer – und andererseits aus den chaotischen Eigenschaften nicht-linearer Systeme, deren Verhalten nur für eine gewisse Zeitspanne im deterministischen Sinne vorhergesagt werden kann. Man denke hier an die Wettervorhersage, deren Zuverlässigkeit nach spätestens 14 Tagen endet. Dennoch kann das Klima, dessen vergangene und zukünftige Entwicklung, einigermaßen zuverlässig prognostiziert werden, da man sich hierbei mit einem statistischen Blick – zum Beispiel mittlere Jahrestemperatur – auf das System begnügt.

Ein hiermit vergleichbares Beispiel ist die Prognose der morphologischen Entwicklung an einer bestimmten Position im Ästuar. Die ist in der Regel über längere Zeiträume nicht sicher möglich. Dagegen ist es »einfacher«, die integrale, mittlere Entwicklung der Bathymetrie in einem regional begrenzten Gebiet zu simulieren, falls keine räumlich korrelierten, systematischen Fehler vorhanden sind. Den augenblicklichen Zustand eines Ästuars (mit allen seinen Eigenschaften) können wir also gut mit einem aktuellen atmosphärischen Zustand vergleichen. Beide können in allen Details nur für eine sehr begrenzte Zeitspanne in die Zukunft vorausberechnet werden.

#### Was hat man eigentlich gemacht, bevor es computergestützte Modellierung gab?

Wasserbau hat in der Menschheitsgeschichte eine lange Tradition. Von daher haben Versuch und Irrtum, empirisch ermittelte Regeln eine lange Geschichte. So können aus genauer Beobachtung Handlungsanweisungen abgeleitet werden. Hierzu fallen mir beispielsweise die Messungen von Hagen (1859) in der Jade ein, die für die Wahl von Wilhelmshaven als neuer kaiserlicher Marinehafen wichtig waren. Oder die Beobachtungen von Hensen (1930er-Jahre) in der Elbe, aus denen unter anderem Empfehlungen zum Bau des Leitdamms Kugelbake abgeleitet wurden und Einblicke in barokline Phänomene gewonnen werden konnten. Schließlich denke ich an den Gebrauch physischer Modelle, die maßstäblich verkleinerte, teilweise verzerrte Abbildungen der realen Systeme waren und für Ems, Weser und Elbe bei der BAW bis in die 1980er genutzt wurden. Ferner entsinne ich mich an analytische Lösungen der grundlegenden Gleichungen für stark vereinfachte Geometrien und Randwerte, wie man es zum Beispiel bei Ippen und Harleman (1966) nachlesen kann. Aus diesen Formulierungen können Aussagen zu prinzipiellen Phänomenen wie dem Einfluss geometrischer Parameter (Länge, Tiefe, Breite) sehr gut abgeleitet werden.



## OBTAIN COMPREHENSIVE HYDROGRAPHIC DATA IN DEEP WATER AND COASTAL REGIONS

We draw on our vast experience and extensive resources, including a fleet of dedicated survey vessels and airborne systems, to deliver a high-quality service that meets your data objectives.

To find out more visit  
[fugro.com](https://www.fugro.com)

**Bisher erschienen:**

Horst Hecht (HN 82),  
 Holger Klindt (HN 83),  
 Joachim Behrens (HN 84),  
 Bernd Jeuken (HN 85),  
 Hans Werner Schenke (HN 86),  
 Wilhelm Weinrebe (HN 87),  
 William Heaps (HN 88),  
 Christian Maushake (HN 89),  
 Monika Breuch-Moritz (HN 90),  
 Dietmar Grünreich (HN 91),  
 Peter Gimpel (HN 92),  
 Jörg Schimmler (HN 93),  
 Delf Egge (HN 94),  
 Gunther Braun (HN 95),  
 Siegfried Fahrentholz (HN 96),  
 Gunther Braun, Delf Egge, Ingo Harre, Horst Hecht, Wolfram Kirchner und Hans-Friedrich Neumann (HN 97),  
 Werner und Andres Nicola (HN 98),  
 Sören Themann (HN 99),  
 Peter Ehlers (HN 100),  
 Rob van Ree (HN 101),  
 DHyG-Beirat (HN 102),  
 Walter Offenborn (HN 103),  
 Jens Schneider von Deimling (HN 104),  
 Mathias Jonas (HN 105),  
 Jürgen Peregovits (HN 106),  
 Thomas Dehling (HN 107),  
 Egbert Schwarz (HN 108),  
 Ingo Hennings (HN 109),  
 Harald Sternberg (HN 110),  
 Uwe Jenisch (HN 111),  
 Petra Mahnke (HN 112),  
 Holger Rahlf (HN 113),  
 Boris Schulze (HN 114),  
 Jacobus Hofstede (HN 115),  
 Gottfried Mandlbürger (HN 116),  
 Gerhard Bohrmann (HN 117)

### Wann nutzt man Simulationen, wann entscheidet man sich für einen Versuchsaufbau, also einen Nachbau der örtlichen Gegebenheiten in miniature?

Bis in die 1980er-Jahre hinein wurden in der BAW physische Modelle der deutschen Ästuare betrieben. Danach wurden sie Schritt für Schritt durch numerische Modelle ersetzt. Für diese Anwendungen wird es kein Zurück mehr geben, schon aufgrund der Größe des natürlichen Systems (und damit auch des physischen Modells) oder der Unmöglichkeit, physikalische Prozesse wie zum Beispiel die barokline Zirkulation korrekt im physischen Modell zu reproduzieren.

Dennoch haben physische Modelle in der BAW dort ihre Berechtigung, wo die numerischen Methoden nicht leistungsfähig genug sind. Ein Beispiel dafür ist das circa 3500 Quadratmeter große Schiffswellenbecken für Untersuchungen im Zusammenhang mit der Wechselwirkung von Wasserstraße und Seeschiff, das für fahrdynamische Untersuchungen genutzt wird. Die Untersuchungen werden dabei mit unterschiedlichen Schiffsmo- dellens hauptsächlich im Maßstab 1 : 40 durchgeführt. Aus diesen Versuchen können dann wiederum Daten zur Validierung numerischer Modelle abgegriffen werden.

Des Weiteren werden mit Hilfe einer Umlaufrinne großmaßstäbliche Versuche durchgeführt, zum Beispiel für die Untersuchung der Strömungsbelastung von Strombauwerken oder für Grundsatzuntersuchungen der Schwebstoff- und Sedimentdynamik, auch unter langperiodisch oszillierender oder bidirektionaler Strömung. So kann zum Beispiel die Bildung von Unter-Wasser-Dünen oder das Verhalten von Fluid Mud anhand von in der Rinne eingebauten Natursedimenten untersucht werden. Auf diesen Gebieten kann das Experiment ebenfalls wichtige Erkenntnisse oder Parameter zur Weiterentwicklung und Validierung numerischer Verfahren liefern.

### Wie gelingt es, ein Modell einfach zu halten, ohne etwas Entscheidendes zu vergessen?

Das ist bestimmt ganz große Kunst: »Mache es so einfach wie möglich, aber nicht einfacher!« Vielleicht ist die Gleichung  $E = mc^2$  das berühmteste Beispiel für einen sehr einfachen, aber doch nicht trivialen Zusammenhang.

Letztendlich ist es wahrscheinlich eine Kombination aus Kenntnis der grundlegenden Gleichungen, aus den numerischen Aspekten ihrer Diskretisierung, den physikalischen Grundprinzipien sowie den prinzipiell damit einhergehenden Phänomenen einerseits, und einem guten Verständnis des aus Beobachtungen bekannten Verhaltens der natürlichen Systeme andererseits. Aus den Abweichungen zwischen Beobachtung und Simulation können Rückschlüsse auf im HN-Modell fehlende oder nur unzureichend abgebildete Prozesse gezogen werden. Dies gelingt umso

leichter, je unterschiedlicher einzelne Phänomene in verschiedenen Systemen ausgeprägt sind. Ein Beispiel: In der Jade und dem Jadebusen sind die Unterschiede im Salzgehalt tendenziell vernachlässigbar, da es keine größeren Süßwasserzuflüsse gibt. Damit spielen dort barokline Druckgradienten und die daraus resultierenden Strömungen praktisch keine Rolle. Der Salzgehalt und die damit einhergehenden Dichteunterschiede könnten in einem HN-Modell der Jade also getrost vernachlässigt werden. Ganz anders sieht das in der benachbarten Weser aus, in der eine ausgeprägte Brackwasserzone vorhanden ist. Würde das in der Jade benutzte vereinfachte HN-Verfahren für die Weser eingesetzt werden, so sollte auffallen, dass dort etwas nicht ganz stimmt. Durch Kenntnis der realen Situation vor Ort (Beobachtung) in Kombination mit dem Wissen um die Prozesse (Theorie) müsste man zu der Schlussfolgerung gelangen, dass barokline Prozesse in einem HN-Modell der Weser unbedingt enthalten sein müssen.

### Wie wichtig ist Datenreduktion?

Der Datenreduktion kommt eine sehr große Bedeutung zu. HN-Modelle sind in der Lage, je Simulationslauf mehrere 10 000 synoptische Datensätze für Wasserstand, Strömung, Salzgehalt usw. zu erzeugen. Diese können durchaus zu eindrucksvollen Animationen aufbereitet werden, um zum Beispiel einen Eindruck von den ablaufenden Phänomenen zu erhalten.

Da wir aber schon etwas über unsere Systeme wissen – der zeitliche Verlauf der vorgenannten Größen ist das Resultat einer periodischen Abfolge mehr oder weniger ähnlicher Tiden –, können wir aus den synoptischen Datensätzen eine überschaubare Anzahl das System beschreibender Kenngrößen ableiten. Hierzu zählen zum Beispiel Tidehochwasser (Thw), Tideniedrigwasser (Tnw), Tidehub (Thb), Eintrittszeiten von Thw und Tnw, Flut- und Ebbedauer sowie weitere Kenngrößen für Strömung, Salzgehalt, Temperatur usw. Auf Basis dieser Kennwerte entsteht ein gut verständliches Bild für zum Beispiel die Ausbreitung der Tidewelle im System (Eintrittszeiten), die Änderung des Tidehubs (geometrische Einengung, Tiefenabnahme, Reflexion und Resonanz) sowie den Einfluss nicht-linearer Prozesse, die sich auf das Tidespektrum (Partialtiden) auswirken.

Neben Kenngrößen können synoptische Daten auch für geeignet definierte Teilbereiche (Kontrollvolumen) aggregiert werden. Hierbei wird zum Beispiel der mittlere Wasserstand, das Wasservolumen, das Salzvolumen, die Sedimentmasse ermittelt. Ferner werden die zwischen Kontrollvolumen vorhandenen Transporte (Wasser, Salz, Wärme, Sediment usw.) berechnet. Damit können im Nachgang zu einer Simulationsrechnung gezielt Fragen an die Modellergebnisse gestellt werden, zum Beispiel: Wie groß ist die mit jeder Tide über den Geise-Leitdamm zwischen

Dollart und Emders Fahrwasser ausgetauschte Wassermenge?

Die Verwendung von Kenngrößen wie auch der aggregierten Daten erleichtert das Systemverständnis in seinen wesentlichen Merkmalen und ist darüber hinaus Grundlage für die Beschreibung von Differenzen zwischen verschiedenen Systemzuständen, wie sie zum Beispiel durch Ausbauvorhaben an den Seeschiffahrtsstraßen oder den Anstieg des Meeresspiegels infolge Klimawandel verursacht werden. Ferner bildet diese Vorgehensweise eine wesentliche Säule der Qualitätssicherung auf Basis weniger Kenngrößen, die das bekannte Systemverhalten in (physikalisch) konsistenter Weise beschreiben.

**Wie leistungsfähig müssen die Rechner sein, mit denen die Modelle durchgerechnet werden?**

Im Gegensatz zum DWD führen wir keine täglichen Vorhersagerechnungen durch, für welche die Ergebnisse zu exakt vorgegebenen Stunden vorliegen müssen. Während auf dem Produktionssystem des DWD wenige Anwendungen (Globalmodell, Europamodell, Regionalmodell) im Ensemble-Modus mit jeweils 40 Vorhersagen viermal täglich Ergebnisse für den einen Nutzer »Wettervorhersage« termingerecht liefern müssen, ist in der BAW die Anzahl der Anwender sowie der Anwendungen sehr wahrscheinlich größer, in jedem Fall aber heterogener. So werden von circa 30 Anwendern regelmäßig Simulationsrechnungen für die Bereiche Nordsee, Deutsche Bucht, Ems-Ästuar, Jade-Weser-Ästuar, Elbe-Ästuar, Ostsee usw. in Kombination mit insbesondere Aggregations- und (Kennwert-) Analyseläufen zur Ausführung gebracht.

Insgesamt stehen auf unserem Rechnersystem 148 Knoten mit jeweils 2x16 Cores zur Verfügung. Alle CPU-zeitintensiven Anwendungen sind parallelisiert (OpenMP und/oder MPI). Die Laufzeiten der Simulationsrechnungen variieren je nach Komplexitätsgrad (Anzahl der berücksichtigten Prozesse) und Simulationszeitraum zwischen wenigen Stunden, einigen Tagen bis zu mehr als einer Woche. Dabei fallen größere Datenmengen an, die bei einer einzigen Simulation mehrere Terabyte betragen können. Die Auslegung des Rechnersystems erfolgt in der Regel so, dass das oben skizzierte Spektrum unterschiedlicher Anwendungen in »vernünftiger« Zeit abgearbeitet werden kann.

**Bei den Verhandlungen am Bundesverwaltungsgericht in Leipzig zur Fahrrinnenvertiefung der Elbe sind auch Untersuchungen der BAW behandelt worden. Wie macht man Prognosen auf Basis von Simulationsrechnungen »gerichtsfest«?**

Letztendlich könnten das natürlich nur die Richter beantworten. Aus meiner Sicht erscheinen folgende Punkte unverzichtbar: Simulationsmethoden, die sich am Stand der Wissenschaft orientieren. Konsequenter und konsistenter Gebrauch einheitlicher Begriffe. Nachvollziehbarkeit der aus den Ergebnissen des HN-Modells abgeleiteten

(Kenn-)Daten und den daraus abgeleiteten Aussagen. Widerspruchsfreiheit zwischen verschiedenen (Kenn-)Größen, das heißt deren Änderungen müssen in sich stimmig sein. Dokumentation der benutzten Methoden im Internet oder durch Veröffentlichung in internationalen Zeitschriften.

Des Weiteren ist anzumerken, dass die Berechnungsergebnisse zwar eine ganz entscheidende Grundlage unserer Gutachten sind, in die gutachterliche Aussage aber auch immer die langjährigen fachlichen Erfahrungen des Gutachters selbst mit einfließen, der die Daten analysiert, gegeneinander abwägt und zusammenfasst.

**Werden durch die autonome Schifffahrt die Anforderungen an die Modellierung steigen, gerade auch mit Blick auf die Aktualität?**

Die Anforderungen an die Verfügbarkeit von Real-Time-Daten – insbesondere Wasserstand und Strömung – und deren Präzision werden sicherlich steigen. Hierfür werden, ähnlich wie heute schon bei der Wettervorhersage des DWD, schnell rechnende HN-Modelle mit Assimilation von Real-Time-Beobachtungsdaten (primär Wasserstand) benötigt, die in regelmäßigen Abständen zeitaktuelle Datensätze liefern, welche schließlich den Schiffen »zeitnah« zur Verfügung gestellt werden.

**Um ein Modell validieren zu können, müssen die Ergebnisse der Simulation mit echten beobachteten Daten verglichen werden. Wenn dann noch nachjustiert werden muss, woher weiß man, was am Modell geändert werden muss?**

Primär wird hierfür der Parameter »Sohlreibung« genutzt, der unter anderem mit den Sedimenten an der Gewässersohle sowie den vorhandenen Sohlformen in einem engen Zusammenhang steht. Die allermeisten Prozesse sind allerdings durch Differenzialgleichungen sowie Parametrisierungen im Wesentlichen festgelegt und entziehen sich daher einer direkten Beeinflussung durch den Anwender eines HN-Modells. Bei persistenten systematischen Abweichungen muss zusätzlich die Qualität der Randwerte überprüft werden, insbesondere von Bathymetrie, Wasserstand auf dem seeseitigen Rand, Abfluss und Windgeschwindigkeit sowie Luftdruck. Im Idealfall sollten die Abweichungen zwischen Simulation und Beobachtung am Ende der Kalibrierphase zufällig verteilt sein.

Bleiben trotz aller Bemühungen systematische Abweichungen weiter bestehen, so könnte dies ein Hinweis auf fehlende oder unzulänglich berücksichtigte Prozesse sein.

**Wie wichtig ist der Analysezeitraum bei der Modellierung?**

Der Analysezeitraum muss mit Hinblick auf die jeweilige Fragestellung gewählt werden und alle

*»Alle größeren Schiffe sollten regelmäßig hydrologische Daten erfassen und automatisch übermitteln«*

Dr. Günther Lang

relevanten natürlichen Phänomene (anregende Kräfte mit ihren jeweiligen Frequenzen) enthalten, die zu deren Beantwortung wichtig sind. Zum Beispiel sehr hohe oder niedrige Abflüsse, Sturmflut- und/oder Starkwindereignisse, besonders starke oder schwache Gezeiten. Ziel ist, das System mit einem möglichst breiten Spektrum anzuregen, so dass die Antwort des Systems dessen intrinsische Eigenschaften (Eigenfrequenzen, Resonanz usw.) zur Geltung bringen kann.

**Wann lagen Sie mit einer aus einer Modellierung abgeleiteten Aussage daneben?**

Zum Beispiel in dem Fall, dass ein vorhandenes ortsspezifisches Modell (Gitter und Bathymetrie), welches für eine bestimmte Fragestellung – nämlich Prognosen für Änderungen bei mittleren Tiden – konzipiert wurde, »blind« für eine andere Fragestellung verwendet wurde – nämlich Prognosen für Änderungen bei Sturmfluten. Im konkreten Fall war das Volumen der Wasserwechselzone für mittlere Tiden korrekt, nicht aber für Sturmfluten, bei denen der mittlere Wasserstand ja deutlich höher liegt, weswegen zusätzliche Flächen überflutet werden. Von daher lagen die zuerst kommunizierten Ergebnisse für die zu prognostizierenden Änderungen deutlich daneben, weil das Volumen der Wasserwechselzone bei Sturmfluten systematisch unterschätzt wurde, was in diesem Fall zu einer deutlichen Unterschätzung der prognostizierten Änderungen des Wasserstands führte. Erst im weiteren Verlauf der Untersuchungen ist uns das aufgefallen. Die Gefahr zu Fehlern ist immer dann groß, wenn man glaubt, schon alles für eine Untersuchung zu haben und darüber vergisst, noch einmal über die eventuell geänderten Anforderungen einer neuen Fragestellung nachzudenken. Insbesondere Zeitdruck kann solche Fehler begünstigen.

**Das Ergebnis der Modellierung ist eine Simulation der Wirklichkeit. Das können Zahlenwerte sein, es kann aber auch eine grafische Animation sein. Wie sehr ähneln die Algorithmen denen bei Computerspielen und zur Erzeugung virtueller Realität?**

Ehrlich gesagt kenne ich mich mit Computerspielen und den dahinterstehenden Algorithmen nicht aus. Ich vermute aber, dass es dort einerseits um eine gute Optik geht – Simulation von Strahlengängen sowie optischer Eigenschaften von Materialien – sowie andererseits einer Simulation der einfachen Bewegung von festen Körpern – ein Ball fliegt oder hüpfert durch die Szenerie.

Zahlenwerte sind das primäre, objektive Ergebnis unserer HN-Modelle. Diese werden bevorzugt zu »klassischen« zweidimensionalen Darstellungen (Zeitreihe, Draufsicht, Seitenansicht usw.) aufbereitet, da diese allgemein bekannt, sehr gut verständlich und außerdem präzise ablesbar sind – was bei perspektivischen Darstellungen oft ein Problem ist. Des Weiteren werden die primären Ergebnisdatsätze physikalisch motiviert weiterverarbeitet. Aufwendige Visualisierungen mit Kamerafahrten

werden nur sehr selten produziert. Dies hat sicher auch damit zu tun, dass die von uns untersuchten Systeme sehr flach sind und damit als dreidimensionale Visualisierung nicht so viel hermachen. Vielleicht bieten in diesem Zusammenhang immersive Techniken in Zukunft neue Möglichkeiten, in die Ergebnisse einzutauchen und sich virtuell an interessante Orte zu begeben. Spannend wäre es zu sehen, was ein Spiele-Programmierer aus unseren Ergebnissen machen würde.

**Was würden Sie gern besser können?**

Singen, Klavierspielen sowie die Beherrschung mehrerer Fremdsprachen.

**Was wissen Sie, ohne es beweisen zu können?**

Ehrlich gesagt: Ich weiß, dass ich fast nichts weiß, was mathematisch sicher nachweisbar wäre. Natürlich lässt sich beweisen, dass gewisse Grundzutaten unserer HN-Modelle gewisse Eigenschaften haben, zum Beispiel dass eine Matrix positiv definit ist, ein CG-Verfahren unter gewissen Bedingungen sicher gegen die (eine) Lösung konvergiert. Aber das Ergebnis einer HN-Modellierung ist Resultat eines komplexen Zusammenspiels von Computer-Hardware, System- und Compiler-Software, dem Simulationsprogramm, einer Vielzahl von Eingangsdaten und schließlich dem Anwender, der für die Simulation verantwortlich ist. Ein Beweis, dass die Simulationsergebnisse im mathematischen Sinne korrekt sind, ist daher schlicht nicht möglich.

Unser Wissen ist schließlich eine kulturelle Errungenschaft, die sich auf dem Gebiet der HN-Modelle und den dahinter stehenden physikalischen, mathematischen und numerischen Grundlagen auf eine Jahrhunderte lange Tradierung von Fakten, Theorien und Regeln stützen kann. Ein guter Bearbeiter und Wissenschaftler darf Ergebnisse von HN-Modellen niemals unreflektiert akzeptieren, sondern muss sie stets kritisch mit seiner eigenen Erfahrung abgleichen. In diesem Zusammenhang möchte ich an zwei Statements des amerikanischen Physikers Richard Feynman erinnern. Erstens: »What I cannot create, I do not understand.« Wir sind also aufgefordert, uns das Wissen so anzueignen, dass wir es mit eigenen Worten wiedergeben können und nicht einfach auswendig Gelerntes herunterspulen. Zweitens: »The scientist has a lot of experience with ignorance and doubt and uncertainty, and this experience is of very great importance.« Dieser Satz unterstreicht noch einmal die Rolle des erfahrenen Anwenders beim Gebrauch von HN-Modellen, der über einen fundierten Gesamtüberblick verfügen und einer gewissen Skepsis nicht abgeneigt sein sollte.

Die Erkenntnis, dass alles Wissen immer nur vorläufig ist, ist unabdingbar für weitere Fortschritte. Wer weiß schon, ob in 100 Jahren HN-Modelle, so wie wir sie heute kennen, überhaupt noch eine Rolle spielen werden. Aber zumindest heute sind sie ein nützliches Werkzeug. Ein Ausdruck unseres Wissens und Könnens. //