

VERONIKA SCHLEPER

VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG FÜR STRÖMUNGSKOMPONENTEN



Veronika Schleper beschäftigt sich seit 2006 mit Fragestellungen der virtuellen Produktentwicklung. Für ihre Dissertation erhielt sie 2009 den Promotionspreis Energie der Enovos Deutschland AG. Nach der Promotion arbeitete Veronika Schleper in einem interdisziplinären Forschungsprojekt an der Beschreibung von Mehrphasenströmungen. 2010 erfolgte die Aufnahme in den Exzellenzcluster Simulation Technology der Universität Stuttgart, in dem sie ab 2013 die Stelle der Visions-Postdoktorandin für virtuelles Prototyping innehatte. 2011 wurde Veronika Schleper in das Eliteprogramm für Postdoktorandinnen und Postdoktoranden der Baden-Württemberg Stiftung aufgenommen. Veronika Schleper habilitierte sich 2015 im Fach Mathematik und hält seither eine Privatdozentur an der Universität Stuttgart. Seit 2016 arbeitet sie als Forschungsingenieurin im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH im Bereich der virtuellen Produktentwicklung für Strömungskomponenten.

Wer kenn ihn nicht, Daniel Düsentrieb, den Tüftler und Ingenieur und seinen legendären Satz „dem Ingeniör ist nichts zu schwör“? Der berühmte Erfinder aus Entenhausen arbeitet in seiner Werkstatt nach einem Versuch-und-Irrtum Prinzip an neuen Produkten und Prototypen. Funktioniert etwas nicht ganz wie gewünscht, wird weiter gebastelt bis die Erfindung die gewünschte Aufgabe erfüllen kann. Dieses Leitbild des klassischen Tüftlers ist in der allgemeinen Vorstellung zum Berufsbild Ingenieur immer noch vorherrschend. Mit der heutigen Realität hat es jedoch nur wenig zu tun.

Statt mit einer neuen Idee direkt in die Werkstatt zu gehen und einen ersten Prototypen zu bauen, analysiert man heute in der Regel zuerst an Hand präziser Berechnungen die Funktionsweise und arbeitet Wirkzusammenhänge heraus. Dies geschieht mit detaillierten Computermodellen, die alle für das Produkt relevanten physikalischen Effekte berücksichtigen. Das kann von der Analyse eines kleinen Details bis zum Nachbau des kompletten Produkts im Computer reichen. Zusammengefasst spricht man dann von virtueller Produktentwicklung und, falls ein vollständiger detailgetreuer Nachbau des Produkts durch Computer erfolgt, auch von einem virtuellen Prototyp. Die analoge Werkbank ist dem virtuellen Raum des Computers gewichen.

Wie kommt das Produkt in den Computer?

Wie soll man sich nun diese ‚virtuelle‘ Werkbank vorstellen? Nehmen wir einmal an, dass Daniel Düsentrieb mit der Zeit geht und die Vorentwicklung seiner Erfindungen mit Hilfe des Computers gestaltet. Sein neuester Auftrag besteht darin, das Geld in Dagobert Ducks Geldspeicher zu trocknen, das durch einen (natürlich missglückten) Angriff der Panzerknacker tropfnass geworden ist. Natürlich darf das Geld den Geldspeicher aus Sicherheitsgründen nicht verlassen und muss daher direkt vor Ort getrocknet werden. Logischerweise hat Herr Düsentrieb

Kurzzusammenfassung:

Der rechnergestützte Nachweis der Funktionsfähigkeit technischer Komponenten spielt in der Entwicklung innovativer Produkte eine immer größere Rolle. Zum einen ermöglichen Simulationen detaillierte räumlich aufgelöste Einblicke in das technische System, die durch traditionelle Messtechnik nicht oder nur mit großem Aufwand erhältlich wären. Zum anderen ermöglicht der Aufbau virtueller Prototypen eine einfache und kostengünstige Erprobung verschiedener Designvarianten und -ansätze.

Zum Aufbau solcher virtueller Prototypen werden die zur Beschreibung des Bauteils relevanten physikalischen Effekte identifiziert, in mathematische Modelle formuliert und anschließend in Computerprogramme übersetzt. Um der Komplexität heutiger technischer Systeme Rechnung zu tragen reichen gängige Simulationsmethoden häufig nicht aus, sodass ein Hauptaugenmerk auf der Entwicklung neuer präziser Modelle zur detaillierten Beschreibung der relevanten physikalischen Effekte liegt.

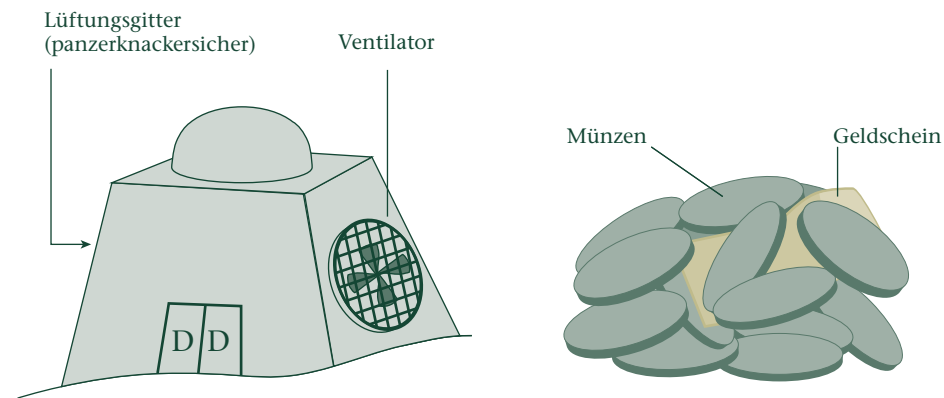


Abbildung 1:
Skizze des Geldspeichers
mit Lüftungsschlitz und
Ventilator.

Abbildung 2:
Skizze des granularen
Materials aus Münzen
und Geldscheinen

auch nur einen einzigen Versuch, um den Auftrag erfolgreich zu erledigen, denn so eine besondere Einzelanfertigung ist sehr teuer und Dagobert Duck nicht als sonderlich spendabel bekannt. Herr Düsentrieb entschließt sich daher dazu, mit Hilfe eines großen Ventilators warme Luft durch den Geldspeicher zu blasen, um das Wasser zu verdunsten und nach außen zu transportieren (siehe Abbildung 1). Er muss jetzt nur noch herausfinden, wie groß der Ventilator sein muss, um das Geld in der vorgegebenen Zeit trocken zu bekommen.

Wie wir alle wissen, ist der Geldspeicher überwiegend mit Münzen gefüllt, allerdings vereinzelt auch mit Geldscheinen durchsetzt. Betrachten wir das Größenverhältnis von Geldmünzen und Geldspeicher, dann

können wir vereinfachend annehmen, dass es sich um ein granulares Medium handelt. Dieses besteht aus festen Körnern (hier den Münzen) und viel Luft und Wasser zwischen diesen Körnern. Im Geldspeicher sind allerdings auch noch Banknoten vorhanden, die ebenfalls Feuchtigkeit speichern und eine viel feinere Struktur haben, was das Trocknen schwieriger macht.

Betrachten wir also einmal genauer, welche physikalischen Effekte wir berücksichtigen müssen, um Münzen und Geldscheine mit Hilfe warmer Luft zu trocknen.

- Die warme Luft trifft seitlich auf das Geld, durchströmt den Geldspeicher in horizontaler Richtung und entweicht auf der anderen Seite wieder. Da der Ventila-

tor etwas Abstand zu den Münzen halten muss, um nichts zu beschädigen, gibt es einen Übergang zwischen einer freien Strömung und einer Strömung in dem granularen Material.

- Das in den Banknoten gespeicherte Wasser und der Wasserfilm auf den Münzen verdunstet.
- Durch die Verdunstung des Wassers wird dem System Wärme entzogen. Die Luft kühlt ab.
- Ist das Geld noch sehr feucht, fließt wahrscheinlich ein Teil des Wassers nach unten ab. Am Boden des Geldspeichers könnten sich also Pfützen befinden.
- Ist die Geschwindigkeit des Luftstroms sehr hoch, kann ein Teil des Wasserfilms an den Münzen auch in Form kleiner Tröpfchen abgetragen und in flüssiger Form nach außen geblasen werden.

Diese Effekte lassen sich zu vier physikalisch unterschiedlichen Effekten zusammenfassen: 1) die Strömung der trockenen Luft, 2) die Verdunstung von Wasser, 3) die Veränderung der Temperatur und 4) die Bewegung von Wasser im granularen Medium. Für eine korrekte Beschreibung des Systems muss man nun alle vier Effekte und deren Interaktion berücksichtigen.

Ähnlich wie beim Aufbau eines realen Prototyps müssen auch bei der Erstellung eines virtuellen Prototyps verschiedene Teile in der richtigen Art und Weise zu-

sammen kommen. Wer sich an den Physikunterricht in der Schule erinnert, weiß, dass physikalische Effekte in Formeln beschrieben werden, mit deren Hilfe man das Verhalten eines physikalischen Systems vorhersagen kann. Diese Übersetzung beobachtbarer Effekte in eine mathematische Sprache wird allgemein als Modellbildung bezeichnet. Man könnte meinen, dass wir inzwischen für jeden (für Ingenieure relevanten) physikalischen Effekt ein passendes Modell und damit auch eine passende Formel haben, so dass eine Vorhersage für jedes beliebige System, Bauteil oder Produkt problemlos möglich sein müsste. Solch ein vollständiger Modellbaukasten liegt leider immer noch im Bereich des Wunschdenkens, denn häufig stößt man schon bei relativ einfachen physikalischen Systemen auf vielfältige Hürden und teilweise auch an die Grenzen des Möglichen. Dabei geht es nicht nur um die Grenzen der verfügbaren Modelle, sondern auch um technische, zeitliche und finanzielle Grenzen, die den Einsatz bestimmter Verfahren oder Methoden unmöglich machen.

Nehmen wir beispielsweise eine beliebige nasse Münze aus dem Geldspeicher. Um zu verstehen, wie sich ein Wassertropfen auf dem Geldstück verhält, können wir die Wechselwirkungen von Wassermolekülen mit den Molekülen des Geldmaterials untersuchen und bewerten, wie sich diese im

„Fundierte virtuelle Produktentwicklung ist ein entscheidender Wettbewerbsvorteil.“

Veronika Schleper

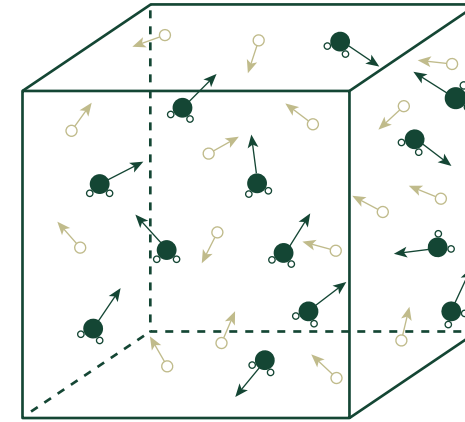
„Virtuelle Produktentwicklung liefert auch dort Einblicke, wo die Messtechnik an die Grenzen stößt.“

Veronika Schleper

Vergleich zu den Wechselwirkungen der Wassermoleküle untereinander verhalten. Genauso lässt sich die Wechselwirkung eines Luftstroms mit dem Wassertropfen analysieren. Aus diesen Informationen lässt sich ein sehr detailliertes Bild erstellen, wie dieser Wassertropfen auf der Münze verdunstet. Die Wechselwirkungen einer Gruppe von Wassermolekülen im flüssigen Zustand kann man sich im Wesentlichen vorstellen wie eine Menge Billardkugeln, die durch elastische Schnüre zu Gruppen zusammengebunden sind. Verdunstet nun ein Teil des flüssigen Wassers, lösen sich einzelne Moleküle aus diesem Verbund, die Schnur wird also durchtrennt. Im gasförmigen Zustand fliegen diese Wasserdampfmoleküle durch die Gegend und stoßen immer wieder mit anderen Luft- oder Wasserdampfmolekülen zusammen. Je nachdem wie diese Stöße stattfinden, ändert sich die Flugbahn der Moleküle. *Abbildung 3* veranschaulicht die Bewegungen einzelner Moleküle in einem Luftvolumen. Um die Wechselwirkungen aller Moleküle zu beschreiben, muss man also all diese Stöße und deren Auswirkungen beschreiben und berechnen. Allerdings sind beispielsweise in einem Wassertropfen von 1 mm Durchmesser bereits 17 Trillionen ($1,7 \cdot 10^{19}$) Wassermoleküle enthalten, deren Wechselwirkungen untereinander berechnet werden müssten. Abgesehen von den

gigantischen Datenmengen zur Speicherung der Positionen der Moleküle sind selbst bei besonders ausgeklügelten Techniken zur Berechnung dieser Molekülinteraktionen schnell Trilliarden an Rechenoperationen nötig. Für ein System der Größe des Duck'schen Geldspeichers wären bei der Nutzung dieser detaillierten Verfahren und Modelle, selbst bei der Verwendung aller weltweit verfügbaren Hochleistungsrechner, Rechenzeiten von mehreren 100 Jahren zu erwarten.

Nichts desto trotz sind diese Detailbetrachtungen auf mikroskopischer Ebene ein wichtiger Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung, denn häufig liefern diese Modelle wesentliche Erkenntnisse, die in die Herleitung sogenannter *makroskopischer Modelle* einfließen. Diese Modelle beschreiben nicht die Bewegung jedes einzelnen Moleküls, sondern das mittlere Verhalten der Moleküle. Man erhält beispielsweise aus dem Volumen V , den Molekülmassen m_i und den Molekülgeschwindigkeiten \vec{v}_i der einzelnen Moleküle i makroskopische Größen wie die (mittlere) Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v} = \frac{\sum m_i \vec{v}_i}{\sum m_i}$, oder die Dichte $\rho = \frac{1}{V} \sum m_i$. So wird nicht die Bewegung einzelner Wassermoleküle verfolgt, sondern das Verhalten beispielsweise nur noch durch die Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit und Dichte charakterisiert. Die so entstandenen makroskopischen Größen entsprechend den Parametern, mit denen wir normaler-



weise eine Strömung auf Grund unserer Wahrnehmung charakterisieren. Auch Herr Düsentrieb wird mit dieser Beschreibung zufrieden sein, da es für ihn nur relevant ist, dass der Luftstrom ausreichend schnell vom Ventilator aus horizontal durch den Geldspeicher weht. Wie sich alle beteiligten Moleküle im Detail bewegen, ist bei einem Volumen der Größe des Duck'schen Geldspeichers nicht von Interesse.

Wir wollen also anhand makroskopischer Größen wie Temperatur, Dichte, Fließgeschwindigkeit und Feuchtegehalt der Luft beschreiben, wie das Wasser auf den Münzen verdunstet. Auf einer einzelnen Münze ist das kein allzu kompliziertes Problem, das sich relativ leicht lösen lässt. Wir müssen aber einen wild durcheinander gewor-

fenen Haufen von (mindestens) mehreren Milliarden Münzen trocknen. Das stellt uns wieder vor ein ähnliches Problem wie bei der Betrachtung der Molekülwechselwirkungen. Obwohl nötiger Speicherplatz und Rechenzeit zur Beschreibung des Verhaltens eines einzelnen Wassertropfens auf einer einzelnen Münze kein Problem darstellen, ist das Gesamtproblem so detailliert nicht berechenbar. Betrachten wir jeden Wassertropfen auf jeder Münze separat, so entsteht wieder ein System mit mehreren Billionen Wassertropfen auf mehreren Billionen Münzen, die von warmer Luft umströmt werden. Solch ein großes System lässt sich mit der heute zur Verfügung stehenden Recheninfrastruktur ebenfalls nicht innerhalb eines Menschenlebens berechnen. Das ist aber auch nicht schlimm, denn die

Abbildung 3: Molekülbewegungen in einem Luftvolumen. Aufgrund von Wechselwirkungen durch Stöße gibt es auf mikroskopischer Ebene keine einheitliche Bewegungsrichtung.

riesige Datenmenge, die dabei entstehen würde, könnten wir nicht vernünftig analysieren und wollen es auch nicht. Für das Gesamtproblem interessiert es uns gar nicht, wann genau welcher Tropfen verschwunden ist. Um zu beurteilen, wie weit der Trocknungsprozess schon fortgeschritten ist, genügt es im Wesentlichen zu wissen, wieviel Wasser insgesamt noch im Geldspeicher ist.

Wir benötigen also ein Ersatzmodell, in dem wir nicht mehr jede einzelne Münze und jeden einzelnen Wassertropfen berücksichtigen müssen. Wir betrachten den großen Haufen aus Geldstücken und Scheinen

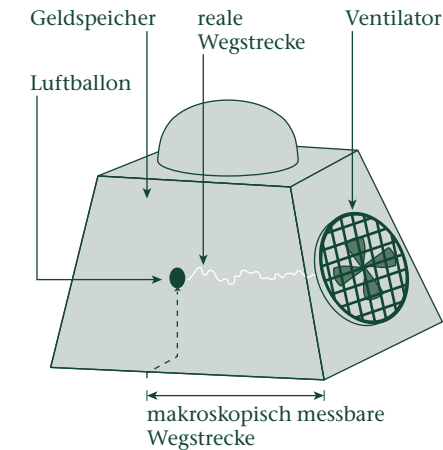
daher als granulares Medium, dessen Körner die Münzen sind und dessen Zwischenräume mit einer Mischung aus Luft und Wasser gefüllt sind.

Die Geldscheine vernachlässigen wir für den

Moment, um das Problem zu vereinfachen. Da nicht alle Münzen gleich groß sind und die Geldstücke auch nicht sauber gestapelt sind, ist das System vergleichbar mit einem Haufen (sehr grobkörnigem) Sand. Strömt nun Luft durch diese Porenstruktur, wird die Luft gezwungen, Umwege zu nehmen. Der direkte gerade Weg ist immer wieder durch Körner versperrt. Der Weg, den die Luft zurücklegen muss, wird länger. Damit ist klar, dass die Porenstruktur des granularen Materials eine wichtige Rolle für die

Interaktion der verschiedenen Effekte des Systems spielt. Es wäre nun naheliegend zu versuchen, die granulare Struktur im Computer nachzubauen und detailliert zu simulieren, wie sich die Luft durch die entstandenen Poren bewegt. Aber auch hier gelangen wir schnell an eine Grenze des Machbaren: Ein grober Vergleich von mittlerer Korngröße (z.B. 1 cm) und der Gesamtgröße des Geldspeichers (Würfel mit einer Kantenlänge von mehreren Metern) zeigt, dass in dem gesamten Geldspeicher mindestens so viele Poren wie Münzen existieren. Der Vergleich des Geldspeichers mit einem grobkörnigen Sandhaufen führt für sich allein daher nicht auf eine Reduzierung der Komplexität des Problems. Allerdings gibt es für granulare Medien Strategien, mit denen sich Strömungen auch für großskalige Probleme effizient berechnen lassen. Diese Strategien stammen aus der Simulation geologischer Strukturen, wo zwischen der feinen Porenstruktur im Boden (meistens deutlich kleiner als 1 cm) und der räumlichen Ausbreitung des Gebiets (üblicherweise mehrere Quadratkilometer, sowie Tiefen von mehreren Metern) ein noch größerer Unterschied ist als in unserem Geldspeicher.

Ähnlich wie beim Übergang von der molekularen Betrachtung zu makroskopischen Variablen wird auch bei diesen Modellen die exakte Mikrostruktur vernachlässigt. Stattdessen wird ein mittlerer Effekt der Porenstruktur berechnet, der unter anderem



die vielen kleinen Umwege bei der Durchströmung eines Granulats berücksichtigt. Betrachten wir beispielsweise die Geschwindigkeit der Luft, die durch den Geldspeicher strömt. Lassen wir direkt hinter dem Ventilator einen extrem miniaturisierten Luftballon los, der von der Größe her durch alle Poren passt, so wird dieser von der Strömung durch den Geldspeicher getragen. Wären sowohl der Geldspeicher als auch die Münzen transparent, könnten wir von außen verfolgen, wie schnell der Luftballon vorankommt, in dem wir messen, welche makroskopisch sichtbare Wegstrecke er in einer bestimmten festgelegten Zeit zurückgelegt hat (siehe Abbildung 4). Diese Geschwindigkeit ist offensichtlich langsamer als die reale Geschwindigkeit des Luftballons, denn der reale Weg, den der Ballon zurücklegt,

ist durch die vielen kleinen Umwege viel länger. Dieser Unterschied zwischen makroskopisch messbarer Geschwindigkeit und der realen Strömungsgeschwindigkeit durch das Granulat wird in unserem Ersatzmodell durch einen zusätzlichen Strömungswiderstand berücksichtigt, so dass sich die Luftströmung durch den Geldspeicher effizient berechnen lässt.

Neben der Einsparung von Speicherplatz und Rechenzeit liegt der Vorteil solcher makroskopischer Modelle insbesondere in der Überprüfbarkeit der Ergebnisse. Makroskopische Größen wie Fließgeschwindigkeit, Druck, Dichte oder Temperatur lassen sich leicht mit gängigen Methoden messen. Doch auch hier kann der Weg zum Ziel mühsam sein. Oft sind detaillierte und aus-

Abbildung 4: Unterschied zwischen realer Weglänge und makroskopischer Weglänge.

„Eine Hauptaufgabe der virtuellen Produktentwicklung ist die Entwicklung akkurater Simulationsmodelle.“

Veronika Schleper

reichend genaue makroskopische Modelle zur Beschreibung spezieller physikalischer Effekte noch nicht vorhanden. Diese physikalischen Effekte müssen dann erst in Formeln und Gleichungen übersetzt werden, bevor sie für den Aufbau eines virtuellen Prototyps zur Verfügung stehen. Das muss auch Herr Düsentrieb feststellen, der mit unserem obigen Modell noch nicht zufrieden sein kann.

Bisher haben wir ein Modell entwickelt, mit dem wir die Strömung der Luft durch den Geldspeicher zwischen den Münzen hindurch gut und effizient beschreiben können. Auch die Verdampfung der Wassertropfen auf den Münzoberflächen können wir berücksichtigen, da es entsprechende Modelle aus geologischen Anwendungen bereits gibt, die wir recht einfach auf unser Problem übertragen können. Für Herrn Düsentrieb reicht das aber leider noch nicht aus, denn die Geldscheine, die vereinzelt zwischen den Münzen liegen, haben wir bisher komplett vernachlässigt. Würde Herr Düsentrieb unser Modell benutzen, ohne die Geldscheine zu berücksichtigen und seine Erfindung mit Hilfe dieser Daten auslegen, würde sein Apparat mit Sicherheit nicht den gewünschten Erfolg erzielen.

Geldscheine bestehen in der Regel aus feinen Baumwollfasern, die eine Art feinporiges Vlies bilden, das Wasser aufsaugen kann,

dadurch aber, im Gegensatz zu normalem Papier, nicht zerstört wird. Im Gegensatz zu den Münzen, auf denen die Wassertropfen nur auf der Oberfläche sitzen, dringt das Wasser vollständig in die Geldscheine ein. Da das feine Vlies zusätzlich nur schwer bis gar nicht von der Luft durchströmt werden kann, kann das Wasser im Inneren der Banknoten nur sehr langsam verdunstet werden. Die Trocknung der Geldscheine dauert also viel länger als die Trocknung der Münzen. Diesen Effekt müssen wir nun in unsere Berechnungen integrieren. Da hier aber kein bestehendes Modell existiert, müssen wir etwas Neues entwickeln.

Solche Weiterentwicklungen bestehender Modelle sowie die Neuentwicklung fehlender Komponenten ist eine der Hauptaufgaben der virtuellen Produktentwicklung. Diese neuen Modelle und Erweiterungen können sowohl durch experimentelle Daten aus Versuchen im Labor als auch durch Computersimulationen mikroskopischer Modelle generiert werden. Um ein neues Modell für unser obiges Beispiel zu erzeugen, können wir drei verschiedene Möglichkeiten in Betracht ziehen.

- Wir gehen ins Labor und messen. Um genug Daten zur Herleitung eines Modells zu bekommen, müssen wir untersuchen, wie viel Wasser in einer Banknote gespeichert ist und wie lange der Trocknungsvorgang bei verschiedenen Lufttemperaturen und

unterschiedlichem Feuchtegehalt der Luft dauert. Dazu werden Temperatur, Feuchte und Geschwindigkeit der Luft sowie, falls nötig, auch der Wassergehalt des Geldscheins variiert. Aus den entstandenen Daten wird ein mathematisches Modell erzeugt, das die Trocknung von Geldscheinen beschreibt.

- Statt Labormessungen durchzuführen, nutzen wir detaillierte (mikroskopische) Simulationen von kleinen Modellsystemen (z.B. ein $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ großer Ausschnitt des Geldspeichers), um die nötigen Daten zu generieren. Dieser Ansatz funktioniert, falls die Wechselwirkungen der verschiedenen Bestandteile des Modellsystems gut bekannt sind. In unserem Fall können wir auf entsprechende mikroskopische Modelle zurückgreifen, so dass das ebenfalls ein zulässiger Ansatz ist.
- Aufbauend auf bestehenden Modellen und unter Berücksichtigung der relevanten physikalischen Effekte wird ein mathematisches Modell erarbeitet, das die Trocknung von Banknoten anhand makroskopischer Parameter wie Temperatur, Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit beschreibt. Wir umgehen also die detaillierte Betrachtung auf Mikroebene. In unserem Fall können wir die Banknote als feinporöse Struktur ansehen und entsprechende bekannte Berechnungs-

delle durch kleinere Änderungen an unser Problem anpassen. Bevor dieses neue Modell aber in unsere Berechnung eingebaut werden kann, sollte durch einige Labormessungen überprüft werden, dass die Ergebnisse mit dem realen Verhalten der Geldscheine übereinstimmen.

Jedes der drei oben genannten Verfahren hat Vor- und Nachteile, und die konkrete Auswahl des Vorgehens hängt immer auch von externen Faktoren ab. Ist beispielsweise kein Labor vorhanden, oder kann der gewünschte Effekt nicht mit ausreichender Genauigkeit messtechnisch erfasst werden, bleibt nur die Verwendung eines Mikromodells. Genauso gut kann es aber sein, dass kein Mikromodell existiert, welches den gewünschten Effekt mit ausreichender Genauigkeit beschreibt. Hier bleibt dann nur der Gang ins Labor.

Jetzt haben wir ein Modell zur Beschreibung der Trocknung von Banknoten, wir müssen es aber auch noch in unser bestehendes Modell zur Beschreibung der Trocknung von Münzen einbauen. Dazu betrachten wir wieder einen kleinen Ausschnitt des Geldspeichers (z.B. $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$). Dieser Ausschnitt ist klein genug, um eine detaillierte Berechnung der Strömung von Luft und Wasser zwischen den Münzen und den Geldscheinen durchzuführen und so den Effekt der enthaltenen Banknoten auf die Strömung zu berechnen. In diese Be-

rechnung fügen wir nun das Modell zur Beschreibung der Trocknung von Banknoten ein, um die Interaktion von Luftströmung und Trocknung der Geldscheine zu berücksichtigen. Das so entstandene Modell nennt man Mesoskalenmodell, weil es in der Regel nur einen kleinen Ausschnitt des Problems betrachtet, diesen aber in der Regel mit höherer Genauigkeit beschreibt. Dieses Mesoskalenmodell muss nun noch in unser Berechnungsmodell integriert werden. Wie bei Versuchen im Labor, können wir dazu beispielsweise wieder Parameter wie Temperatur, Feuchte und Geschwindigkeit der Luft, sowie den Wassergehalt des Geldscheins variieren, um aus den gewonnenen Daten ein Ersatzmodell zu generieren. Alternativ können wir auch durch Mittelung der enthaltenen Variablen und Parameter direkt ein neues Modell erzeugen. Dazu können wir die gleichen Ansätze aus der Simulation geologischer Anwendungen nutzen, die wir zur Erzeugung des Modells zur Trocknung der Münzen benutzt haben.

Unser Modell ist jetzt also fertig. Leider kann Herr Düsentrieb damit immer noch nicht viel anfangen. Um zu verstehen, ob seine Erfindung funktionieren kann, muss er erst möglichst genaue Daten des Geldspeichers haben. Die Abmessungen Länge, Breite und Höhe sind recht einfach zu beschaffen und auch die Korngröße des granularen Materials lässt sich durch die Größen der verschiedenen Münzen gut bestimmen. Schwieriger

wird es da schon mit der Frage, wieviel Wasser sich im Geldspeicher noch befindet und wie es genau verteilt ist. Befinden sich viele kleine Tröpfchen auf den Münzen oder sind die Münzen sogar mit einem geschlossenen Wasserfilm bedeckt? Gibt es auf dem Boden des Geldspeichers Wasserpfützen oder liegen vielleicht sogar einige Münzen und Geldscheine vollständig im Wasser? Diese Daten lassen sich unmöglich in der nötigen Genauigkeit beschaffen, denn sowohl der Geldspeicher als auch die Menge an Münzen sind viel zu groß, um ausreichend detaillierte Messungen vorzunehmen.

Herr Düsentrieb muss also damit leben, dass er für den aktuellen Zustand im Geldspeicher nur sehr grobe Schätzwerte hat. Da der aktuelle Zustand aber Ausgangspunkt aller Berechnungen ist, bedeutet das, dass die Ergebnisse des virtuellen Prototyps mit recht großen Unsicherheiten behaftet sind. Es könnte beispielsweise sein, dass Herr Düsentrieb die Gesamtmenge an Wasser im Geldspeicher drastisch unterschätzt hat und ihm der virtuelle Prototyp eine viel zu niedrige Trockenzeit vorhersagt. Den Ventilator würde Herr Düsentrieb dann recht klein bauen, nach der vorgesehenen Trocknungszeit wären die Münzen aber noch nass und sein Auftraggeber vermutlich nicht zufrieden. Ähnliches kann passieren, wenn Herr Düsentrieb davon ausgeht, dass keine Wasserpfützen im Geldspeicher vorhanden sind, obwohl sich große Mengen an Was-

ser auf dem Boden befinden. Andersherum könnte es auch sein, dass die Wassermenge im Geldspeicher überschätzt wird. Dann würde Herr Düsentrieb den Ventilator zu groß bauen und zu lange laufen lassen, was unnötig hohe Kosten verursachen und ihm große Probleme mit Dagobert Duck einhandeln würde.

Das Problem fehlender Daten bringt Herrn Düsentrieb also in ein echtes Dilemma. Soll er es riskieren und den Ventilator gemäß den Vorhersagen des virtuellen Prototyps bauen oder soll er eventuell einen etwas größeren und teureren bauen, um auf der sicheren Seite zu sein? Oder soll er gar das Risiko eingehen und einen etwas kleineren bauen, um besonders günstig zu sein? Glücklicherweise können wir ihm auch hier weiterhelfen. Wir haben zwar keine Ahnung, wie viel Wasser genau im Geldspeicher ist, aber wir können sinnvolle Werte angeben, wie viel Wasser mindestens und maximal enthalten ist. Dasselbe gilt für die Verteilung des Wassers. Die exakte Verteilung ist nicht bekannt, aber wir wissen grob, in welchem Rahmen wir uns bewegen. Es ist beispielsweise ausgeschlossen, dass alles Wasser an der Oberfläche auf den Münzen schwimmt. Mit diesen Informationen können wir das Risiko, das Herr Düsentrieb bei den oben genannten drei Varianten eingeht, bewerten. Ein möglicher Ansatz dazu ist, durch eine Reihe von Simulationen herauszufinden, wie groß der Einfluss unterschiedlicher Wasserverteilungen

auf das Trocknungsergebnis ist. Wir wählen also (möglichst geschickt) eine Anzahl an verschiedenen Startbedingungen aus und berechnen wie trocken der Geldspeicher mit dem gegebenen Ventilator wird. Dadurch lässt sich sehr einfach abschätzen, ob der Ventilator die richtige Größe hat.

Wieso macht man das überhaupt?

Für Herrn Düsentrieb ist von Anfang an klar, dass er nur einen Versuch haben wird, um eine funktionierende technische Lösung zu liefern. Daher müsste er möglichst sicher sein, dass seine Erfindung funktioniert. Eine Unterstützung durch einen virtuellen Prototyp ist da sehr hilfreich, denn viele Detailfragen können damit beantwortet werden bevor der reale Prototyp gebaut wird. Aber wie sieht es in Fällen aus, in denen uns nicht Dagobert Duck im Nacken sitzt? Wann lohnt es sich überhaupt einen virtuellen Prototyp statt eines realen Musterstücks zu bauen? Betrachten wir dazu zuerst ausschließlich die Kosten zur Erstellung eines Prototyps, dann schlagen für den virtuellen Prototyp folgende Kosten zu Buche:

- Kosten für die Entwicklung und Implementierung notwendiger neuer mathematischer Modelle (falls nötig)

”Nur der fachübergreifende Austausch von Ingenieuren, Mathematikern, Informatikern und Naturwissenschaftlern ermöglicht eine zuverlässige virtuelle Produktentwicklung.“

Veronika Schleper

- Kosten für die Erstellung des Gesamtmodells
- Kosten für Rechnerinfrastruktur und Betriebskosten (Hochleistungsrechner, große Datenspeicher, ...)
- Kosten für die Auswertung der Ergebnisse

Dem gegenüber stehen Kosten für den Aufbau realer Prototypen, die sich grob aufschlüsseln lassen in

- Kosten für die Spezifikation der nötigen Bauteile
- Kosten für die Beschaffung der nötigen Bauteile
- Kosten für Infrastruktur (Laborflächen, Laborausstattung, ...)
- Kosten für den Aufbau des Prototyps
- Kosten für Messungen und Auswertung

Stellt man diese Kosten einander gegenüber, so ist die virtuelle Produktentwicklung oft nicht billiger als der Aufbau eines realen Prototyps. Die klassische Sichtweise, dass virtuelle Produktentwicklung vor allem Entwicklungskosten senkt, ist daher nicht immer richtig. Kosten für Modellentwicklung und Implementierung sind häufig die größten Posten. Ist aber von vorne herein klar, dass verschiedene, technisch sehr ähnliche Produkte entworfen werden sollen, sinken die anteiligen Kosten der Modellentwicklung je Prototyp. Damit sinken die Gesamtkosten für die Entwicklung aller Produkte unter die Kosten des Aufbaus mehrerer Prototypen.

Eine ähnliche Betrachtung gilt für die Entwicklung teurer Einzelstücke, deren Material- oder Produktionskosten so hoch sind, dass vorab keine Muster aufgebaut werden können, so ähnlich wie es bei Herrn Düsenriebs Problem der Fall war. Aber auch in diesen Fällen ist die reine Kosteneinsparung in der Regel nicht der entscheidende Antrieb zur Erstellung virtueller Prototypen.

Der entscheidende Vorteil virtueller Prototypen ist, dass praktisch an jedem Punkt des Prototyps Daten generiert und ausgewertet werden können – also auch an Stellen, die für klassische Messtechnik nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zugänglich sind. Wir können also an Stellen sehen, die wir weder mit bloßem Auge, noch mit Messapparaturen erreichen können. Herr Düsenrieb könnte beispielsweise genau sehen, ob auch in den Ecken des Geldspeichers genug Luft ankommt, um eine schnelle Verdunstung des Wassers zu gewährleisten. So lässt sich ein vollständiges Bild der Funktion des Produkts erstellen, sowie mögliche Schwachstellen einfach identifizieren. Zusätzlich ermöglichen es virtuelle Prototypen, den Einfluss von ungenauen Daten oder Fertigungstoleranzen auf die Funktionsfähigkeit des Produkts zu bewerten und das Produkt systematisch zu optimieren. Die Bewertung der Auswirkungen einer Änderung des Designs benötigt bei virtuellen Prototypen ausschließlich einen neuen Simulationslauf, so dass in kurzer Zeit sehr

viele Variationen getestet werden können. Dem gegenüber muss bei der Verwendung realer Prototypen für jede Designänderung ein neuer Prototyp erstellt werden. Man kann also bei gleichen Kosten und gleichem Zeitaufwand mit einem virtuellen Prototyp mehr Designs testen und so schneller und näher an das physikalische Optimum kommen.

Lohnt es sich also für Herrn Düsenrieb, in Zukunft für jede seiner Erfindungen zuerst einen virtuellen Prototyp zu bauen? Vermutlich nicht, denn Herr Düsenrieb ist und bleibt ein Bastler und Tüftler, der seine Erfindungen mit viel Intuition und Erfahrung zusammenbaut. Dabei spielt es für ihn auch keine Rolle, ob das Endergebnis eine

optimale Lösung ist, Hauptsache es funktioniert. In der Realität ist das anders, denn dort ist es wichtig, die fehlerfreie Funktion eines Produkts garantieren zu können. Kostendruck und technisch sehr ausgefeilte Systeme machen es zusätzlich häufig nötig, optimale technische Lösungen zu finden, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Die virtuelle Produktentwicklung mit ihrer Stärke, einen Prototyp auf Herz und Nieren auch an physikalisch nicht zugänglichen Stellen prüfen zu können, sowie der kostengünstigen Möglichkeit Designoptimierungen zu testen, spielen daher eine immer größere Rolle im Entwicklungsprozess. Für den Entwicklungsingenieur von heute ist es daher fast schon selbstverständlich, auch virtuelle Prototypen aufzubauen.