

Zwischen Glaskugel und Wissenschaft Wann sind Brandsimulationen vertrauenswürdig?

Matthias Münch¹

¹ INURI GmbH, Haderslebener Strasse 9, Berlin
Kontakt: Matthias.Muench@inuri.de

Kurzfassung:

Mit dem Begriff „Brandsimulation“ wird in der Anwendungspraxis von Brandschutzingenieuren die Abbildung der bei einem Brandereignis auftretenden chemisch und physikalisch wirksamen Prozesse mit Hilfe eines numerischen Rechenverfahrens verstanden. Dies umfasst die Darstellung des Brandes, als eigentliche Quelle von Wärmeenergie und Verbrennungsprodukten, als auch die Ausbreitung von Wärme und Brandrauch in einem Bauwerk sowie gegebenenfalls weitere Wechselwirkungen wie z.B. Bauteilerwärmungen.

Eine Brandsimulation ist somit die Verkopplung einer Vielzahl unterschiedlicher Modellansätze zur Darstellung physikalischer oder chemischer Wechselwirkungen. Einige der hierbei benötigten Prozesse sind bis heute im Detail noch gar nicht vollständig verstanden, also noch Gegenstand der Forschung. Für andere Prozesse existieren bereits weitgehend universelle Modellansätze zur detaillierten Beschreibung der Wechselwirkungen. Allerdings lassen sich diese detaillierten Modelle in der Anwendungspraxis des Brandingenieurwesens selten anwenden, da die hierfür erforderliche Rechenleistung den in der Anwendung noch wirtschaftlichen Umfang überschreitet. Brandsimulationsprogramme für die Anwendungspraxis müssen somit zwangsläufig eine Reihe von Vereinfachungen und Parameterisierungen mit Hilfe von Modellparametern verwenden. Erst diese Vorgehensweise ermöglicht die Anwendung derartiger Simulationen in der Praxis, begrenzt allerdings ihren den Anwendungs- und Gültigkeitsbereich.

In der Praxis werden Brandsimulationen sowohl zur Begründung von regulativen Bau- und Gestaltungsvorschriften, als auch zum Nachweis verwendet, dass durch innovative Brandschutzkonzepte von diesen regulativen Vorschriften abgewichen werden kann. Realistisch anmutende Animationen und Berechnungen mit vielen Nachkommastellen vermitteln den Eindruck größter Genauigkeit der aufwendigen Computerberechnung.

Doch wie vertrauenswürdig sind derartige Simulationsrechnungen wirklich? Anhand von Beispielen der im Brandschutz eingesetzten Simulationsprogramme Fire Dynamics Simulator und OpenFOAM wird gezeigt, dass auch Simulationen mit als etabliert betrachteten Softwareprogrammen einer detaillierten Betrachtung und Prüfung bedürfen, bevor die berechneten Ergebnisse als vertrauenswürdig eingeschätzt werden können. Die auftretenden Schwierigkeiten liegen hierbei häufig im Detail verborgen. Ihre Identifizierung erfordert eine konzeptionelle Eignungsprüfung des zu verwendenden Programms, deren Umfang weit über die alleinige Beherrschung der Programmbedienung hinausgeht.

1 Einleitung

Der Einsatz von Ingenieurverfahren im Brandschutz, insbesondere von sogenannten Brandsimulationen, wird immer dann interessant, wenn sich gestalterische oder betriebswirtschaftliche Ziele mit konventionellen Regelwerken nicht erreichen lassen. Brandsimulationen dienen dann häufig dem Nachweis, dass sich mit Hilfe alternativer Sicherheitskonzepte die geforderten Schutzziele ebenfalls erreichen lassen. Klassische Aufgabenstellungen sind zum Beispiel:

- die Vermeidung einer Ertüchtigung einer ungeschützten Stahltragswerkskonstruktion,
- der Nachweis, dass verlängerte Flucht- und Rettungswege ausreichend lang passierbar bleiben oder
- der Brandausbreitung durch die vorgesehenen Löschhilfanlagen ausreichend Einhalt geboten wird.

Mit den Simulationen wird folglich die Tauglichkeit von individuell angepassten Sicherheitskonzepten untersucht, um in besonders gefährdeten oder risikobehafteten Bauwerken die Einhaltung der vorgegebenen gesetzlichen, versicherungsrechtlichen oder vom Betreiber aufgestellten Schutzziele nachzuweisen.

Auf dem Markt finden sich zu diesem Zweck eine ganze Reihe von Simulationsprogrammen und beständig kommen neue Entwicklungen oder abweichende Varianten hinzu. Dieser Beitrag beschränkt sich auf die Betrachtung der Simulation von brandinduzierten Strömungen. Hierbei speziell auf die dafür eingesetzten CFD-Simulationsprogramme (*CFD: Computational Fluid Dynamics*). Trotz dieser Einschränkung liefert eine kurze Recherche bereits 24 CFD-Programme, die für Brandschutzzwecke eingesetzt wurden oder werden. Hierbei konkurrieren kommerzielle Anbieter mit ambitionierten OpenSource-Projekten.

Eines der bekanntesten und sicher im englischsprachigen Anwenderbereich auch am weitverbreitetsten CFD-Simulationsprogramme ist der *Fire Dynamics Simulator (FDS)* des National Institute of Standards and Technology (NIST) [1]. Sehr wesentliche Gründe für diese Verbreitung sind die kostenlose Verfügbarkeit, die Spezialisierung des Programms auf die spezifischen Fragestellungen des Brandschutzingenieurs mit einer darauf abgestimmten Nutzerschnittstelle, die öffentlich verfügbare Dokumentation und ein von den Entwicklern sehr aktiv moderiertes Frage- und Diskussionsforum.

Eher im wissenschaftlichen Bereich, aber mit zunehmender Häufigkeit, finden sich Anwendungsbeispiele der Softwarebibliothek *OpenFOAM* [7] der OpenCFD Limited. Dieses OpenSource-Simulationspaket ist nicht speziell für die Brandschutzanwendung entworfen und erfordert vom Anwender ein wesentlich umfangreicheres Wissen über numerische Verfahren und deren Zusammenwirken.

Anhand der beiden Simulationsprogramme *Fire Dynamics Simulator* und *OpenFOAM* zeigt der Vortrag exemplarisch, dass vertrauenswürdige Simulationsergebnisse nicht nur einen beträchtlichen Aufwand, sondern eine fundierte Kenntnis des Anwendungsgebietes, als auch der numerischen Verfahren voraussetzt. Der Anwender kann nicht von einer prinzipiellen Eignung des Programms ausgehen, beispielsweise weil das betreffende Programm von zahlreichen anderen Anwendern verwendet wird.

In Ergänzung zum Vortrag wird in diesem Artikel eine Methodik zur Eignungsüberprüfung vorgestellt, mit dem Anwender und Prüfer die Voraussetzungen für vertrauenswürdige Simulationsergebnisse systematisch abarbeiten und prüfen können. Eine ausführlichere Begründung dieser Methodik mit wesentlich mehr Beispielen findet sich in [5].

2 Zwischen Glaskugel und Wissenschaft

Der zugegeben provokant gewählte Titel beschreibt das Spannungsverhältnis bei der praktischen Anwendung von Brandsimulationsprogrammen recht gut. Es ist immer wieder erstaunlich, welche Aussagen aus den Ergebnissen von Brandsimulationsprogrammen abgeleitet bzw. welche Aussagen mit Hilfe der Simulationen begründet werden. Einen fundierten Nachweis, dass das verwendete Programm bzw. die durchgeführte Simulation diese Aussagen überhaupt oder sogar in der hierfür notwendigen Genauigkeit liefern kann, findet sich eher selten.

Tatsächlich ist die Durchführung einer numerischen Simulation, jedenfalls soweit die Ergebnisse auch belastbar sein sollen, noch immer eine wissenschaftliche und vor allen Dingen sehr aufwendige Aufgabenstellung. Dies wird an ausgewählten Beispielen des Vortrages deutlich, die zudem die Notwendigkeit der in Kapitel 3 dargestellten Eignungsüberprüfung begründen. Eine ausführliche Darstellung dieser und zahlreicher weiterer Beispiele findet sich in [5], so dass aus Platzgründen an diesem Artikel auf eine erneute Darstellung verzichtet wird.

In den nachfolgenden Abschnitten werden einige wesentlichen Probleme und Fehlerursachen beschrieben, die die in Kapitel 3 beschriebene Eignungsüberprüfung erforderlich machen.

2.1 Copy & Paste – Simulationen

Das Prinzip „Copy & Paste“ ist auch im Bereich der numerischen Simulation eine beliebte Vorgehensweise. Wenn eine Funktions- oder Vorgehensweise unbekannt ist, sind Lösungsbeispiele eine große Hilfe. Die relevanten Abschnitte dieser Beispiele lassen sich als Lösungsansatz mit ihren Konfigurationseinstellungen in die eigene Problemstellung übernehmen. Gerade bei den komplexen Brandsimulationen nimmt die Anzahl der Konfigurationseinstellungen dann schnell zu, so dass die Kopie einer alten ähnlich gelagerten Simulationsaufgabe eine willkommene Arbeitsvorlage und Erleichterung ist.

Hiergegen ist zunächst wenig einzuwenden, wenn der Anwender erstens genau weiss, was er da gerade tut und zweitens im Anschluss sorgfältig abprüft, dass die übernommenen und ggf. veränderten Einstellungen in ihrer Gesamtheit auch den vorgegebenen Zweck sachgerecht erfüllen.

Bei der Fülle an Modellparametern in den beispielhaft angeführten Simulationsprogrammen *Fire Dynamics Simulator* und *OpenFOAM* ist das jedoch nicht immer ganz einfach. Um hier „Copy & Paste“-Fehler auszuschließen ist eine strukturierte und vor allem problemangepasste Überprüfung der Programmkonfiguration unabdingbar. Eine solche Struktur bietet die in Kapitel 3 dargestellte Eignungsüberprüfung.

2.2 Einschätzung von Modellvereinfachungen

Gerade in dem anwendungsorientiert entwickelten *Fire Dynamics Simulator* werden dem Anwender eine Vielzahl von Modellansätzen zur Berücksichtigung unterschiedlichster Detailprobleme angeboten. Hierzu gehören

- strukturelle Lösungsansätze, wie z.B. die Zerlegung des Rechengebietes in Teilgebiete als Grundlage für die Parallelisierung bzw. Gitteroptimierung, die Wahl unterschiedlicher Diskretisierungen der Teilgebiete zur besseren Auflösung von lokalen Bereichen, die Gitterverzerrung zur Optimierung von z.B. Wandgrenzschichten,
- grundlegende CFD-Modellansätze, wie z.B. die Berücksichtigung von Turbulenz, Wärme-konvektion, Wärmestrahlung oder den Partikeltransport,

- brandschutzspezifische Modellierungsansätze, wie z.B. die Berechnung des Wärmeeintrages in Wände, die Berechnung von Auslösezeitpunkten von Sprinklern oder Rauchdetektoren, die Berechnung des Abbrandverhaltens von ein- und mehrschichtigen Bauteilen oder auch die Berücksichtigung von Ventilatoren usw.

Der Umstand, dass diese und weitere Modellansätze in dem *FDS*-Programmcode enthalten sind rechtfertigt allerdings nicht die Annahme, dass sie auch für die vom Anwender vorgesehene Anwendung geeignet sind¹. Die *FDS*-Entwickler weisen darauf auch ausdrücklich in den Disclaimer hin:

Users are warned that FDS is intended for use only by those competent in the fields of fluid dynamics, thermodynamics, heat transfer, combustion, and fire science, and is intended only to supplement the informed judgment of the qualified user. The software package is a computer model that may or may not have predictive capability when applied to a specific set of factual circumstances. Lack of accurate predictions by the model could lead to erroneous conclusions with regard to fire safety. All results should be evaluated by an informed user.

Dieser Hinweis ist durchaus nicht nur als vorsorgliche Absicherung gegen etwaige Klagen vor Gerichten gemeint, sondern spiegelt die Einstellung der *FDS*-Hauptentwickler wieder, wie u.a. zahlreiche Gespräche mit Kevin McGrattan oder Randy McDermott immer wieder zeigten.

Der Nachweis der Anwendbarkeit der verwendeten Programmkonfiguration für die konkrete Problemstellung liegt somit in der Pflicht des Anwenders. Für den Nachweis vertrauenswürdiger Simulationsergebnisse muss er zeigen, dass

1. die von ihm gewählten Modellansätze fehlerfrei funktionieren,
2. die Kombination von Modellansätzen, Modellparametern und Diskretisierung für die Aufgabenstellung prinzipiell geeignet ist und
3. die mit den gekoppelten Modellvereinfachungen erzielten Ergebnisse auch noch in einem verwertbaren Abweichungsintervall liegen.

Bei der Fülle an Modellansätzen, Interaktionen und Parametern in Verbindung mit der vom Anwender vorgenommenen individuellen Diskretisierung erfordert ein derartiger Nachweis ebenfalls ein strukturiertes und vor allem von Dritten nachvollziehbares Vorgehen. Eine solche Struktur bietet die in Kapitel 3 dargestellte Eignungsüberprüfung.

Die hier in Kürze zusammengefassten Anforderungen zeigen bereits, dass der Einsatz von Simulationsprogrammen nicht nur ein sehr akribisches und selbstkritisches wissenschaftliches Vorgehen erfordert, sondern auch sehr spezielle Fachkenntnisse. Die im Vortrag oder auch in [5] dokumentierten Beispiele belegen die Notwendigkeit der in Kapitel 3 dargestellten Eignungsüberprüfung. Nur auf diese Weise kann die Zulässigkeit der getroffenen Annahmen für den betrachteten Anwendungsfall sicher nachgewiesen werden. Der Aufwand hierfür ist erheblich und die Anwendung von Brandsimulationen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sicher nicht bei jedem Anwendungsfall sinnvoll. Fehlt dieser Nachweis allerdings, gleicht die Verwendung derartiger Simulationsergebnisse dem Blick in eine Glaskugel.

¹Beispielhaft sei auf die Problematik der Kopplung von Turbulenz- und Verbrennungsmodellierung unter Berücksichtigung der im Brandschutz üblichen Raumdiskretisierungen verwiesen, die im Tagungsband der 3. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztagung beschrieben wurde [6].

3 Vertrauenswürdige Simulationen

Grundsätzlich sind Simulationsergebnisse nicht automatisch richtig bzw. vertrauenswürdig, nur weil bspw. das Simulationsprogramm nicht abgestürzt ist oder keine gravierenden Fehlermeldungen ausgegeben hat. Auch die Verwendung von Eingangsdaten aus anderen Simulationsläufen erfordert immer wieder eine Überprüfung. Ob als Anwender oder als Begutachter einer Simulation, die nachfolgenden Fragen sind stets aufs Neue zu stellen und zu beantworten:

1. Ist die Simulationssoftware für die vorgesehene Untersuchung geeignet?
2. Ist die Simulationssoftware richtig eingesetzt worden?
3. Sind die berechneten Ergebnisse richtig interpretiert worden?

Die vollständige Beantwortung aller Fragen verlangt die genaue Kenntnis des Simulationsziels und der Aufgabenstellung². Ein Verweis, dass das verwendete Programm ja bereits von zahlreichen Dritten oder in anderen Projekten eingesetzt wurde, beantwortet keine dieser Fragen. Auch die alleinige Validierung anhand eines Brandversuchs ist nicht ausreichend.

Es ist vielmehr so, dass für die Beantwortung dieser Fragen neben der anwendungsbezogenen Fragestellung auch die physikalischen Details der Modellgleichungen zur Abbildung der als relevant eingeschätzten Prozesse, die mathematisch-numerischen Eigenschaften der Simulationssoftware sowie die vom Anwender vorgenommenen Einstellungen der Simulationsparameter betrachtet werden müssen. Die Durchführung einer Brandsimulation mit Hilfe von CFD-Programmen ist somit noch immer eine komplexe wissenschaftliche Aufgabe und nicht jede Modelloption einer Software ist auch immer sinnvoll einsetzbar.

3.1 Voraussetzungen

Mit dem Ziel sowohl Anwendern als auch Prüfern derartiger Simulationsrechnungen die sachgerechte Beurteilung von Simulationen zu ermöglichen, wurde durch den Autor ein Konzept zur Eignungsüberprüfung von Brandsimulationsrechnungen entwickelt³. Der in [5] erstmals vorgestellte Konzeptansatz beschreibt eine umfassende Eignungsprüfung und berücksichtigt sowohl die spezifischen numerischen Konstruktionsdetails des Simulationsprogramms, als auch experimentelle Erfahrungen aus z.B. Brandversuchen im Kontext der konkreten Aufgabenstellung. Kernpunkte des Konzeptansatzes sind die folgenden drei Voraussetzungen:

1. Alle relevanten Prozesse werden in isolierten Untersuchungen betrachtet und müssen für den Anwendungsfall eine ausreichende Ergebnisqualität aufweisen.
2. Im Vergleich mit geeigneten Brandexperimenten muss das Simulationsprogramm eine ausreichend genaue Wiedergabe der gewünschten Größen liefern.
3. Die Beurteilung der Aussagequalität erfolgt unter Berücksichtigung mathematisch-numerisch orientierter Qualitätsmaßstäbe und der eingesetzten numerischen Lösungsverfahren.

Diese etwas abstrakten Voraussetzungen schliessen bereits leider die in der Brandingenieurpraxis beliebten Zonenmodelle von einer derart fundierten Überprüfung aus. Die Ursache hierfür

²Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Brandsimulationen in Brandschutzkonzepten treten natürlich noch weitere Fragen auf. Hierfür wird auf die Beschreibung in [2] verwiesen.

³Der Konzeptansatz wurde 2014 von der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) mit dem Excellence Award 2014 als herausragende wissenschaftliche Leistung ausgezeichnet.

liegt in der Konstruktion der Zonenmodelle. In einem Zonenmodell ist die rechentechnisch aufwendige Kopplung der Impulsgleichungen mit den anderen Erhaltungsgleichungen durch einen stark vereinfachten, empirisch / experimentell begründeten Modellansatz (das sogenannte Plume-Modell) ersetzt worden. Gerade dieser algorithmisch, als auch rechentechnisch sehr aufwendige Modellbereich ist jedoch für die Interaktion brandschutzrelevanter Prozesse wie Advektion, Durchmischung, Strahlung usw. maßgeblich. Diese erheblichen Vereinfachungen führen somit zwar zu den extrem kurzen Rechenzeiten, entziehen die Zonenmodell-Programme aber gleichzeitig weitgehend den fundamentalen Überprüfungsansätzen der Numerischen Mathematik bzw. der isolierten Betrachtung einzelner relevanter Prozesse. Die nachfolgenden Beschreibungen beschränken sich somit auf CFD-Simulationsprogramme oder auch Feldmodelle.

3.2 Konzept der Eignungsüberprüfung

Die vorangegangenen Erläuterungen zeigen bereits, dass eine Überprüfung eines Simulationsprogrammes als Ganzes eine zu komplexe und nicht zudurchdringende Aufgabenstellung ist. Die vorgestellte Eignungsüberprüfung macht sich daher die Konstruktion eines CFD-Programms zu nutze und zerlegt die Aufgabenstellung in einzelne überschaubare Teilaufgaben. Da es sich bei der Aufgabenstellung um die Bewertung eines numerischen Simulationsverfahrens handelt, ist es naheliegend, für die Bewertung auch numerische Kriterien heranzuziehen. Hierbei sind die in Abbildung 1 dargestellten Einflüsse der unterschiedlichen Entwicklungsphasen eines CFD-Programms zu berücksichtigen.

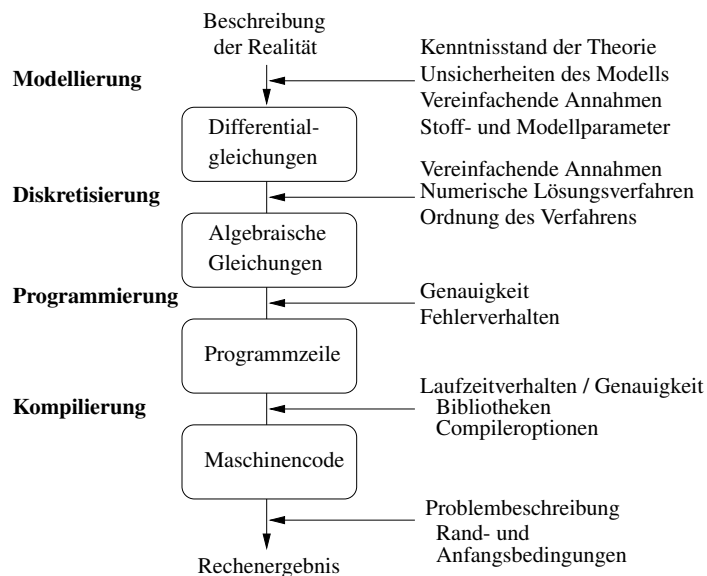


Abbildung 1: Entwicklungsphasen eines CFD-Programms [4].

Von der Modellbildung mit Hilfe der Prozessbeschreibenden Differential- oder Integralgleichungen, der Umwandlung in computertaugliche algebraische Gleichungen und numerische Lösungsverfahren mit Hilfe der Diskretisierung, der Umsetzung in Programmzeilen mit Hilfe einer Programmiersprache bis hin zur Umwandlung dieser Programmzeilen in ausführbaren Computercode, ist an allen Stellen eine Einflussnahme auf die quantitative und qualitative Güte des CFD-Programms möglich und teilweise auch unvermeidbar. Das Konzept muss prinzipiell diese Einflussfaktoren berücksichtigen. Abstrahiert sind dies die für die Simulation notwendigen physikalischen und chemischen Prozessabbildungen (Modell), die Eigenschaften numerischer Lösungstechniken und -verfahren (Verfahren), sowie die programmtechnische Umsetzung

(Programm), die unter den individuellen Qualitätsanforderungen der jeweiligen Aufgabenstellung betrachtet werden müssen.

Um die Komplexität der Aufgabenstellung zu reduzieren, erfolgt eine derartige Programmüberprüfung nicht nur in Bezug auf das Programm als Ganzes, sondern auch auf die isolierte Betrachtung von einzelnen Programmteilen bzw. Komponentengruppen. Auf diese Weise lassen sich Abweichungen nicht nur einzelnen Programmkomponenten zuordnen, sondern auch Fehlerauslöschungen zwischen Programmkomponenten identifizieren.

3.2.1 Klassifizierung der Testkriterien

Die zur Bewertung herangezogenen Testkriterien lassen sich in vier Kategorien einteilen. Jede dieser Kategorien hat im Hinblick auf die vorgesehene Eignungsüberprüfung spezifische Eigenschaften:

1. Analytische Tests

Dies sind Testfälle für die aus den fundamentalen Gleichungen der Physik eine mathematisch exakte Lösung hergeleitet werden kann. Dieser Idealfall ist leider nur für sehr spezielle Konfigurationen möglich, die in der Regel wenig Ähnlichkeiten mit praktischen Problemstellungen haben. Allerdings lässt sich mit analytischen Testfällen der Einfluss aller Entwicklungsphasen eines CFD-Programms sehr genau untersuchen. Der Begriff „analytisch“ ist hierbei in der mathematischen Sprachkonvention zu verstehen. Die im Brandingenieurwesen häufig als analytisch bezeichneten empirisch ermittelten Relationen, wie z.B. die Plumeformeln, gehören nicht hierzu.

2. Numerische Tests

Hierunter sind numerisch ermittelte Vergleichsdaten zu verstehen. Diese können bspw. durch Parametervariationen oder durch einen Ergebnisvergleich mit speziell für den untersuchten Testfall entwickelten Programmen entstehen. Sie ermöglichen z.B. die Abschätzung des Einflusses von Modellapproximationen.

3. Semi-experimentelle Tests

Hierunter sind Experimente und Datenvergleiche zu verstehen, bei denen aus der Vielfalt der im Brandfall beteiligten Prozesse nur einzelne physikalische Prozesse oder Prozessgruppen betrachtet werden. Die Untersuchung der Couette- oder Taylor-Couette-Strömung oder eben auch die im Brandschutz gern verwendeten Plumeformeln sind Beispiele hierfür.

4. Experimentelle Tests

Die letzte Gruppe fasst alle weiteren Experimente zusammen, die sich nicht mehr auf einzelne Phänomene oder Detailkonfigurationen konzentrieren. Aufgrund des damit verbundenen Aufwandes sind dies meist Repräsentationen einzelner Stichproben. Beispielhaft seien Brandversuche mit realen Bränden in Hallen inklusive der Zu- und Abluftöffnungen oder auch mit Löschsystemen genannt. Derartige experimentelle Untersuchungen repräsentieren im günstigsten Fall ein reales Brandereignis und damit den Anwendungsfall von Brandsimulationsprogrammen.

Um möglichst allgemeingültige und nicht auf einzelne Anwendungsfälle beschränkte Aussagen zu erhalten, werden je nach Testkategorie insbesondere allgemeinere, mathematisch-numerisch motivierte Bewertungskriterien wie Stabilität, Ordnung und Konvergenz herangezogen. Erst derartige mathematisch-numerische Methoden liefern bei geeigneten Testfällen den

angestrebten Nachweis, dass die visuelle festgestellte Übereinstimmung der Daten nicht rein zufälliger Natur ist.

3.2.2 Aufbau einer Testmatrix

Unter Verwendung der beschriebenen Techniken und Methoden lässt sich ein umfassender Verifikations- und Validierungsnachweis aufbauen. Die Basis dieses Nachweises bildet die sogenannte Testmatrix, die in einer übersichtlichen Form quasi das Inhaltsverzeichnis des V&V-Leistungsnachweises darstellt. Hierbei werden die in Abschnitt 3.2.1 eingeführten Vergleichsdaten durch Abkürzungen repräsentiert: Analytische Tests [A], Numerische Tests [N], Semi-experimentelle Tests [SE] und Experimentelle Tests [E]. Hinzu kommen numerisch orientierte Testkriterien wie Ordnung und Konvergenz [OK], die Parametersensitivität [PS], Randbedingungen [RB], spezifische numerische Modellparameter [MP] u.v.a.m.

In Verbindung mit den einzelnen physikalischen Submodellen des untersuchten CFD-Programms ergibt sich dann für jeden einzelnen Testfall ein Zeileneintrag in der Testmatrix in Tabelle 1.

Test	Typ	Physikal. Komponenten						Strukturtest
		Gasdynamik	Gravitation	Viskosität	Turbulenz	Strahlung	weitere ...	
Test A	A	✓	✓					RB
Test B	N	✓		✓				GZ,OK
Test C	E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MP

Tabelle 1: Beispiel einer Testmatrix.

Zu jedem dieser Testfälle gehört eine ausführliche Dokumentation, die u.a. die Zielsetzung des Tests, die verwendete Programmversion, die verwendeten Eingabeparameter – im Idealfall die tatsächlichen Eingabedateien – sowie die Herkunft der Vergleichsdaten inklusive von Literaturhinweisen angibt. Muster und Beispiele hierzu finden sich u.a. in [3, 8].

3.3 Durchführung der Eignungsüberprüfung

Der Aufbau der im vorgehenden Abschnitt beschriebenen Testmatrix für den zu betrachtenden Anwendungsfall erfolgt unter Berücksichtigung der drei grundlegenden Schritte eines V&V-Leistungsnachweises. Dies sind die:

1. Programmqualifizierung
2. Programmverifizierung
3. Programmvalidierung

Hierzu ermittelt der Anwender zunächst die spezifischen Eigenschaften des Anwendungsfalls. Welche Fragestellungen sollen mit der Simulation untersucht werden? Welche physikalischen Prozesse bestimmen maßgeblich das Ergebnis?

In der Programmqualifizierung führt der Anwender zunächst mit Hilfe der Programmdokumentation den Nachweis, dass das Programm alle Modelle bereitstellt, die für das zu simulierende Problem erforderlich sind und dass die Modellansätze prinzipiell für die Abbildung der Problemstellung geeignet sind. Nach diesem Schritt sind die notwendigen physikalischen Programmkomponenten (vgl. Tabelle 1) identifiziert.

Im zweiten Schritt der Programmverifizierung muss der Anwender nun die korrekte Implementierung und prinzipielle Funktionsfähigkeit bzw. Fehlerfreiheit dieser Programmbestandteile nachweisen. Dies geschieht mit Hilfe der in Abschnitt 3.2.1 analytischen, numerischen oder semi-experimentellen Tests. Zur Erfüllung der ermittelten Anforderungen sind in den Modellen bereits bestimmte Definitionen von Modellparametern oder Diskretisierungen erforderlich, damit die betrachteten Programmkomponenten / -modelle die gewünschten Ergebnisse liefern. Dies beschränkt die Möglichkeiten des Anwenders die Diskretisierung und / oder die zahlreich vorhandenen Modellparameter frei zu wählen.

Mit der folgenden Programmvalidierung wird die Frage beantwortet, ob die berechneten Ergebnisse auch eine ausreichend akkurate Repräsentation der abzubildenden Problemstellung darstellen. Dies geschieht mit Hilfe von Simulationen von mit der Aufgabenstellung vergleichbaren Anwendungsfällen, wie z.B. Brandversuchen. Hierbei sind die bei der Programmverifizierung ermittelten Beschränkungen der Modellparameter und Diskretisierung zu berücksichtigen. Gegebenenfalls erfordert dies auch mehrere Iterationen, bis ein geeigneter Modellparametersatz gefunden wurde, der sowohl die Anforderungen der Programmverifizierung als auch der Programmvalidierung erfüllt. Es ist allerdings auch möglich, dass der Anwendungsfall mit dem Programm nicht in einer praktikablen Weise zu untersuchen ist. Die Abbildung 2 zeigt das Ablaufschema einer derartigen Eignungsüberprüfung.

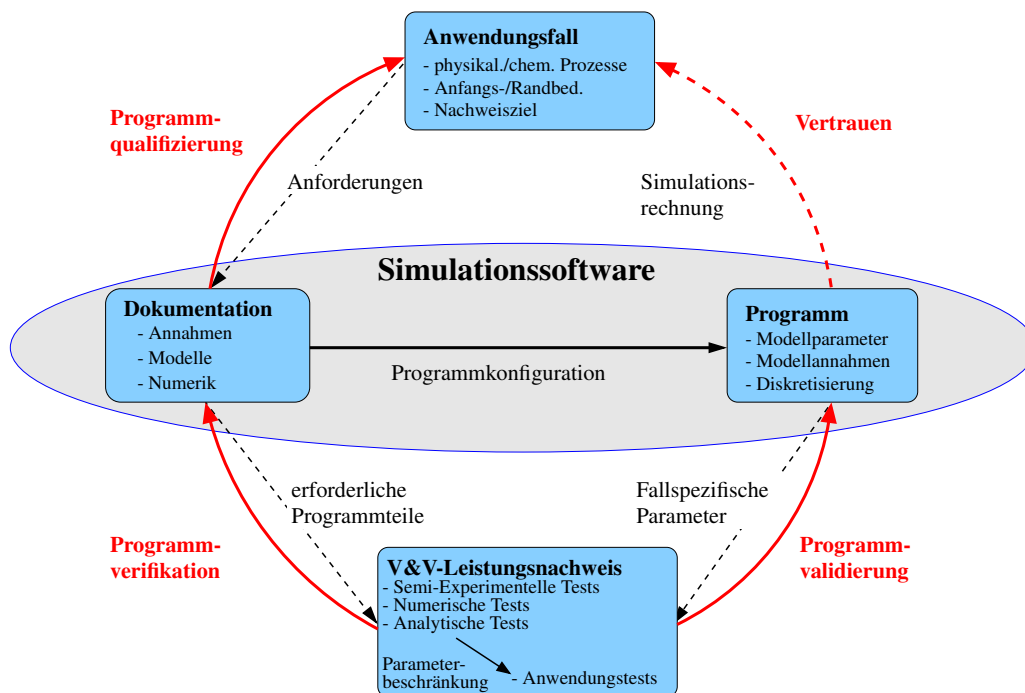


Abbildung 2: Ablaufschema Eignungsüberprüfung [5].

Die vorgestellte Vorgehensweise erlaubt Dritten eine relativ rasche Überprüfung vorgelegter Simulationsrechnungen, weil alle wesentlichen Fragestellungen abgearbeitet und dokumentiert werden müssen.

LITERATUR

- [1] **NIST: Fire Dynamic Simulator (FDS) and Smokeview.**
URL <http://fire.nist.gov/fds>
- [2] **Hosser, D.** (Hg.): *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*, Bd. TB 04-01. Technisch-Wissenschaftliche Beirat (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Postfach 1231, Altenberge, 3. Aufl., 2013.
- [3] **ISO-16730-1: Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods.** International Organization for Standardization, Technical Committee ISO/TC 92, Fire Safety, Subcommittee SC 4, Fire safety engineering.
- [4] **Münch, M.; Klein, R.**: *Anforderungen an numerische Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung im Vorbeugenden Brandschutz.* *vfdb-Zeitschrift*, Bd. 3:S. 145 – 151, August 2008.
- [5] **Münch, M.**: *Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr.* INURI Verlag, zugleich Dissertation der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Juni 2013. ISBN 978-3-944809-00-7.
- [6] **Münch, M.; Gerber, S.; Oevermann, M.**: *Analyse von verschiedenen Verbrennungsmodellen im Hinblick auf Brandsimulationen in praktischen Geometrien..* In U. Krause (Hg.), *3. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Tagungsband.* Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2013.
- [7] **OpenFOAM Foundation: Open Field Operation and Manipulation (OpenFOAM).**
URL <http://www.openfoam.org/>
- [8] **VDI 6019 Blatt 2: Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Ingenieurmethoden.** Verein Deutscher Ingenieure, Juli 2009.