

# SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

# ERSTE BENCHMARK-RECHNUNGEN IM RAHMEN DES INTERNATIONAL COLLABORATIVE PROJECT TO EVALUATE FIRE MODELS FOR NPP APPLICATIONS

BMU - 2005-665



# "Erste Benchmark-Rechnungen im Rahmen des International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for NPP Applications"

M. Röwekamp

M. Heitsch

W.Klein-Heßling

**IMPRESSUM** 

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für

Umwelt. Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben.

Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine

Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie

die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der

weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss

nicht mit der des BMU übereinstimmen.

<u>Herausgeber:</u>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 2

Postfach 12 06 29

53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2005

# Kurzfassung

Brandsimulationsrechnungen und rechnerische Nachweisverfahren haben vor allem im Zusammenhang mit der Überprüfung der Brandsicherheit in Betrieb befindlicher Kernkraftwerke eine zunehmende Bedeutung erlangt. Sie gelten als zulässige Analysehilfsmittel bei der risikoorientierten Bewertung der Brandsicherheit. Der Nutzen von rechnerischen Vorhersagen, sowohl zur Implementierung von Nachrüstungen als auch für eine nachvollziehbare Bewertung des vorhandenen oder auch geplanten Brandschutzes wird, mittlerweile gerade auch in der Kerntechnik erkannt und geschätzt.

Um derartigen Aspekten auch bei der Erstellung neuer oder Aktualisierung bestehender kerntechnischer Regelwerke zum Brandschutz Rechnung zu tragen, wurde 1999 das "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications" ins Leben gerufen. Damit sollten Erkenntnisse und Erfahrungen diverser Fachinstitutionen weltweit genutzt werden, um den Stand von Wissenschaft und Technik bei der Modellierung von Bränden im Hinblick auf eine Anwendung in kerntechnischen Anlagen zu bewerten und ggf. zu verbessern.

Eine erste Referenzaufgabe (Benchmark Exercise) wurde inzwischen mit unterschiedlichen Brandsimulationscodes verschiedenen Typs (Zonenmodellen, Lumped-Parameter- und CFD-Codes) vergleichend modelliert. Auch von deutscher Seite wurden dazu Berechnungen mit den verschiedenen Arten von Modellen durchgeführt. Die Ergebnisse des ersten Benchmarks zeigen bereits deutlich sowohl die Anwendungsmöglichkeiten der Programme als auch diverse Einschränkungen bzgl. der Anwendbarkeit bestimmter Modelltypen oder bestimmte Codes auf. Eine Weiterführung der Arbeiten wird dementsprechend von allen beteiligten Fachleuten und der USNRC als federführender Aufsichtsbehörde in diesem Projekt für unabdingbar erachtet.

## **Abstract**

Fire simulations as well as analytical validation procedures have gained more and more significance, particularly in the context of the fire safety analysis for operating nuclear power plants. Meanwhile, fire simulation models have been adapted as reliable analytical tools for a risk oriented fire safety assessment.

The use of calculational predictions could be demonstrated, on the one hand for the improvements and upgrades of the fire protection by the licensees and on the other hand as a tool for a reproducible and clearly understandable estimations in the frame of assessing the available and/or foreseen fire protection measures by the authorities and their experts. For consideration of such aspects even in the frame of implementing new nuclear fire protection standards or upgrading existing ones, an "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications" has been started in 1999, to make use of the experience and knowledge of a variety of expert institutions in this field worldwide to assess and improve, if necessary, the state-of-art with respect to modeling fires for application to nuclear installations/plants. A first benchmark exercise has meanwhile been carried out with participation of the various codes of different types (zone model, lumped parameter codes, CFD codes). German calculations have been performed with different model types. The result of this first benchmark clearly shows possibilities applying such simulation models as well as their limitations with respect to the applicability of particular model types and/or individual codes to the given conditions. A continuation of the activities is therefore seen to be absolutely necessary by the experts involved as well as by USNRC as leading authority within this project.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung der internationalen Zusammenarbeit		
2	Bisherige Arbeiten der Projektphase 1	6	
2.1	Definition der Referenzaufgabe Nr. 1	6	
2.2	Parametervariation	11	
3	Benchmark-Rechnungen der GRS und des iBMB mit		
	verschiedenen Arten von Brandsimulationscodes	14	
3.1	Ergebnisse der COCOSYS-Rechnungen	14	
3.1.1	Nodalisierung des Brandraumes	15	
3.1.2	Ergebnisse für Teil I	18	
3.1.3	Ergebnisse für Teil II	21	
3.1.4	Schlussfolgerungen der COCOSYS-Rechnungen	26	
3.2	Rechnungen mit dem CFD-Code CFX	27	
3.2.1	Ergebnisse für Teil I - Basisfall	27	
3.2.2	Ergebnisse für Teil I - Fall 5	29	
3.2.3	Ergebnisse für Teil II - Basisfall	31	
3.2.4	Ergebnisse für Teil II - Fall 10 mit Ventilation	32	
3.3	Ergebnisse der Rechnungen mit dem Zonenmodell CFAST	37	
3.3.1	Rechenergebnisse für Teil I und II	37	
3.3.2	Anwendungsgrenzen des Brandsimulationsprogramms CFAST		
	Abbrandmodell	47	
4	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	50	
5	Literatur	54	

# **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1.1:	Teilnehmende Organisationen	3
Tab. 2.1:	Thermophysikalische Eigenschaften der Umfassungsbauteile	9
Tab. 2.2:	Thermophysikalische Eigenschaften der Kabel (PVC)	9
Tab. 2.3:	Angaben zum Papierkorbbrand	g
Tab. 2.4:	Brandverhalten der Kabelisolierung	10
Tab. 2.5:	Konfigurationen für Teil 1 der Referenzaufgabe	12
Tab. 2.6:	Konfigurationen für Teil 2 der Referenzaufgabe	13

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Brandraum mit Öffnungen und Kabeltrassen	7
Abb. 2.2:	Energiefreisetzungsrate des Papierkorbbrandes (Teil 1)	. 10
Abb. 2.3:	Energiefreisetzungsrate des Kabelbrandes (Teil 2)	. 11
Abb. 3.1:	Darstellung der verwendeten Nodalisierung	. 16
Abb. 3.2:	Nodalisierung in den verschiedenen Ebenen	. 17
Abb. 3.3:	Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke (Zone RH6O)	. 19
Abb. 3.4:	Sauerstoffkonzentration im Zentrum unterhalb der Decke (Zone	
	RH6O)	. 20
Abb. 3.5:	Target-Oberflächentemperatur	. 20
Abb. 3.6:	Wärmefreisetzung (Basisfall, Fall 5, Fall8)	. 22
Abb. 3.7:	Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke	. 22
Abb. 3.8:	Sauerstoffkonzentration	. 23
Abb. 3.9:	Oberflächentemperatur des Targets	. 23
Abb. 3.10:	Wärmefreisetzung (Basisfall, Fall 8, Fall 9)	. 24
Abb. 3.11:	Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke (Basisfall, Fall 8, Fall	
	9)	. 25
Abb. 3.12:	Sauerstoffkonzentration (Basisfall, Fall 8, Fall 9)	. 25
Abb. 3.13:	Oberflächen- und Zentraltemperatur des Targets (Basisfall, Fall 8, Fall	
	9)	. 26
Abb. 3.14:	Modellierung des Kabelraums mit Papierkorb	. 28
Abb. 3.15:	Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der höchsten Wärmefreisetzung	
	(#1, Basisfall)	. 29
Abb. 3.16:	Brandraum mit Ventilationsöffnungen (Fall 5)	. 30
Abb. 3.17:	Temperaturfeld unter ventilierten Bedingungen (#1, Fall 5)	. 30
Abb. 3.18:	Gittermodell für die Simulation des Kabelbrands (Part II)	. 31
Abb. 3.19:	Gaskonzentrationen kurz vor Eintritt von Sauerstoffmangel (#2,	
	Basisfall)	. 33
Abb. 3.20:	Zustrom von Kaltluft (#2, Basisfall)	. 33
Abb. 3.21:	Abströmen von Brandgasen aus der Leckage (#2, Basisfall)	. 34
Abb. 3.22:	Zustrom von Kaltluft über die Ventilation (#2, Fall 10)	. 35
Abb. 3.23:	Wärmefreisetzung der berechneten Fälle Part II	. 36
Abb. 3.24:	Vergleich der Oberflächentemperaturen des Targetkabels (Part II)	. 36
Abb. 3.25:	Mittlere Rauchgastemperatur, Teil 1, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 1 bis 3	. 39

Abb. 3.26:	Lage der Grenzschicht, Teil 1, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen	
	1 bis 3	. 39
Abb. 3.27:	Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse A, Teil 1,	
	Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 3	. 40
Abb. 3.28:	Mittlere Rauchgastemperatur, Teil 1, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 4 und 5	. 40
Abb. 3.29:	Lage der Grenzschicht, Teil 1, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen	
	4 und 5	. 41
Abb. 3.30:	Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse A, Teil 1,	
	Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 4 und 5	. 41
Abb. 3.31:	Energiefreisetzungsrate, Teil 2, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 1 bis 8	. 43
Abb. 3.32:	Energiefreisetzungsrate, Teil 2, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 9a, 9b, 10	. 44
Abb. 3.33:	Mittlere Rauchgastemperatur, Teil 2, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 1 bis 8	. 44
Abb. 3.34:	Mittlere Rauchgastemperatur, Teil 2, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 9a, 9b, 10	. 45
Abb. 3.35:	Lage der Grenzschicht, Teil 2, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen	
	1 bis 8	. 45
Abb. 3.36:	Lage der Grenzschicht, Teil 2, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen	
	9a, 9b, 10	. 46
Abb. 3.37:	Mittlere Temperatur der Kaltgasschicht, Teil 2, Ausgangskonfiguration,	
	Konfigurationen 9a, 9b, 10	. 46
Abb. 3.38:	Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse B, Teil 2,	
	Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 9a, 9b, 10	. 47

# 1 Einleitung und Zielsetzung der internationalen Zusammenarbeit

Risikoorientierte Brandschutzanforderungen für die Auslegung und brandschutztechnische Nachrüstung von Gebäuden in kerntechnischen Anlagen, z.B. in Kernkraftwerken, müssen sich an den nuklearspezifischen wie auch den brandschutztechnischen Schutzzielen orientieren. Um die große Bandbreite möglicher Brandwirkungen erfassen und vorhersagen zu können, werden weltweit zunehmend analytische Methoden und Computerprogramme angewendet.

In den traditionellen normativen Anforderungen bzw. Reglementierungen werden die möglichen Konfigurationen für Brandschutzmaßnahmen zum einen aus der Betriebserfahrung und zum anderen aus geltenden Regeln und Richtlinien sowie aus Experimenten und Prüfungen abgeleitet, welche prinzipiell immer auf ingenieurmäßigen Beurteilungen basieren.

Brandsimulationsrechnungen und rechnerische Nachweisverfahren haben vor allem im Zusammenhang mit der Überprüfung der Brandsicherheit in Betrieb befindlicher Kernkraftwerke eine zunehmende Bedeutung erlangt. Dies gilt sowohl für deterministische Brandgefahrenanalysen als auch für probabilistische Brandrisikobewertungen. Derartige rechnerisch-analytische Verfahren haben bereits Eingang in die neueren Regelwerke gefunden, sowohl international (z. B. in den Richtlinien der International Atomic Energy Agency IAEA) als auch national (z. B. im aktuellen Regelentwurf der U.S. Nuclear Regulatory Commisssion, USNRC oder in der deutschen KTA 2101, Teil 1-3 /KTA 00, KTA 00a, KTA 00b/. Sie gelten als zulässige Analysehilfsmittel bei der risikoorientierten Bewertung der Brandsicherheit. Der Nutzen von rechnerischen Vorhersagen, sowohl für die Betreiber von kerntechnischen Anlagen - u. a. zur Implementierung kosteneffizienter Systeme bei Nachrüstungen - als auch für Gutachter und Behörden für eine nachvollziehbare Bewertung des vorhandenen oder auch geplanten Brandschutzes wird mittlerweile gerade auch in der Kerntechnik erkannt und geschätzt.

Dennoch ist das Phänomen "Feuer" immer noch ein nicht einfach vorherzusagendes Ereignis. Den auf dem Gebiet der Brandsicherheit tätigen Fachleuten ist durchaus bewusst, dass alle derzeit dazu verfügbaren Rechenmodelle ihre Grenzen haben und nicht ohne vertiefte Kenntnis der unterschiedlichen Phänomene und Randbedingungen für jede Problemstellung anzuwenden sind.

Um diesen Aspekten auch bei der Erstellung neuer oder Aktualisierung bestehender kerntechnischer Regelwerke zum Brandschutz nach Stand von Wissenschaft und Technik Rechnung tragen zu können, rief die amerikanische Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde für kerntechnische Einrichtungen USNRC (<u>U</u>nited <u>States Nuclear Regulartory Commission</u>) im Jahr 1999 ein internationales Gemeinschaftsprojekt ins Leben, in dessen Rahmen bereits bestehende Programme auf ihre Anwendbarkeit, insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt der Einbindung validierter rechnerischer Methoden in zukünftige Regelwerke, überprüft und für dementsprechende Anwendungen auch validiert werden sollen.

Daraus ging das "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications" hervor, in welchem neben den Vertretern von der USNRC diverse weitere Fachleute, sowohl von Seiten der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden sowie technischen Sicherheitsorganisationen und Forschungsinstitutionen als auch von Seiten der Hersteller und Betreiber kerntechnischer Einrichtungen, zusammenarbeiten (Tab. 1.1). Von deutscher Seite sind an diesem Projekt bislang die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) und das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig beteiligt.

Im Rahmen dieser derzeitigen internationalen Zusammenarbeit werden sowohl die Erkenntnisse und Erfahrungen als auch die finanziellen, personellen und technischen Ressourcen von diversen Organisationen genutzt, um gemeinsam den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik bei Brandsimulationsmethoden und Computerprogrammen im Hinblick auf Anwendungen auf die besondere Situation in kerntechnischen Anlagen zu bewerten und zu verbessern /DEY 01a/.

Tab. 1.1: Teilnehmende Organisationen

Nuclear Regulatory Commission	USNRC	USA
National Fire Protection Association	NFPA	USA
National Institute of Standards and Technology	NIST	USA
Fauske & Assoc.		USA
Arup Fire		USA
Nuclear Installations Inspectorate	NII	UK
W.S. Atkins		UK
Industry Management Committee		UK
	CTICM	Frankreich
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit	GRS	Deutschland
Nuclear Energy Institute	NEI	USA
Worchester Polytechnic University	WPI	USA
University of Maryland	UMD	USA
Building Research Establishment	BRE	UK
Building Research Institute	BRI	Japan
Institute for Protection and Nuclear Safety	IPSN	Frankreich
Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus	VTT	Finnland
Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz	iBMB	Deutschland
Westinghouse Engineering		USA
Duke Energy		USA
Electric Power Research Institute	EPRI	USA
Electricité de France	EdF	Frankreich

Die derzeitige Zusammenarbeit im Rahmen des "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications" dient vorrangig

- der Erfassung des internationalen Kenntnisstandes zu Brandsimulationsrechnungen, den zugehörigen Computerprogrammen (Rechencodes) und den ihnen zugrunde liegenden physikalischen Modellen,
- der Prüfung der möglichen Anwendbarkeit wie auch der Grenzen derartiger Rechnungen für die Bewertung des Brandschutzes in Kernkraftwerken sowie des möglichen Einbezugs solcher Verfahren in die Regelwerke aus internationaler Sicht,

- der Erarbeitung von analytischen Hilfsmitteln für konkrete Anwendungen bei der Bewertung der Brandsicherheit von Kernkraftwerken (deterministisch wie probabilistisch) sowie
- der beispielhaften Anwendung von Brandsimulationsrechnungen für ausgewählte typische kernkraftwerksspezifische Gegebenheiten und Brandszenarien mit einer Bewertung der Aussagesicherheit dieser Analysehilfsmittel für einen späteren nationalen und internationalen Einsatz derselben bei der Bewertung der Brandsicherheit.

Dazu wird das Gemeinschaftsprojekt in zwei Phasen durchgeführt: In der ersten Phase soll der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Simulationsmodelle für Brände, insbesondere im Hinblick auf die komplexen geometrischen Gegebenheiten in Kernkraftwerken und die nuklearspezifischen Besonderheiten einschließlich der dort vorhandenen Brandlasten, bewertet werden. Dabei sollen vor allem Rechenmodelle hinsichtlich der Möglichkeit untersucht werden, mit ihnen stichhaltige, nachvollziehbare und plausible Ergebnisse für die Entscheidungsfindung im Rahmen des Genehmigungs- und Aufsichtsverfahrens bereitzustellen.

Mit der zweiten Phase des Projektes soll begonnen werden, sobald die den Stand von Wissenschaft und Technik repräsentierenden Möglichkeiten aber auch die Grenzen der möglichen Anwendungen der verschiedenartigen Rechenmodelle und jeweiligen Simulationscodes für die brandschutztechnische Bewertung in Kernkraftwerken aufgezeigt und dokumentiert sind. In dieser Phase sollen die analytischen Verfahren und Brandsimulationsprogramme weiterentwickelt und an speziell für die kerntechnischen Anwendungen konzipierten Brandversuche erprobt werden, um eine erweiterte Anwendung, u. a. für die brandschutztechnische Bemessung aber auch für die Entscheidungsfindung bei der deterministischen wie probabilistischen Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken, zu ermöglichen. Am Ende der zweiten Projektphase sollen dann Vorschläge erarbeitet werden, wie die Möglichkeit der Anwendung von rechnerisch-analytischen Verfahren in die aktualisierten Regelwerke zum Brandschutz für kerntechnische Einrichtungen mit einzubeziehen sind.

Aufgrund dieser Vorgehensweise und Zielsetzung wurde eine aktive Teilnahme deutscher Fachleute an den konkret durchzuführenden Brandsimulationsrechnungen für erforderlich erachtet. National werden die in Deutschland entwickelten bzw. weiterentwickelten rechnerischen Verfahren sowohl bei der deterministischen Gefahrenanalyse

als auch bei probabilistischen Risikostudien eingesetzt. Durch die Teilnahme an einem solchen internationalen Gemeinschaftsprojekt ergibt sich zum einen die Möglichkeit, die derzeit national verfügbaren analytischen Verfahren direkt mit weiteren, teils vergleichbaren teils aber auch deutlich anderen Ansätzen folgenden Verfahren zu vergleichen und die Ergebnisse verschiedener Brandsimulationsrechnungen mit denen von anderen, in diesem Projekt beteiligten Institutionen mit den gleichen aber auch mit zum Teil deutlich andersartigen Rechencodes zu vergleichen. Zum anderen lässt sich dadurch auch die Aussagesicherheit der eigenen Untersuchungen besser beurteilen.

Durch die Mitwirkung in diesem internationalen Gemeinschaftsprojekt werden darüber hinaus die Weichen gestellt, dass auch andere deutsche Experten in Zukunft an dieser Zusammenarbeit beteiligt werden können und international entwickelte analytische Bewertungsinstrumente auch deutschen Fachleuten nicht nur für den Bereich der Kernkraftwerke zur Verfügung stehen

# 2 Bisherige Arbeiten der Projektphase 1

## 2.1 Definition der Referenzaufgabe Nr. 1

Eine wesentliche Aufgabe im Rahmen der ersten Phase des internationalen Gemeinschaftsprojektes /DEY 01a/ ist die Definition von typischen Raum- und Brandlastkonfigurationen mit der Fragestellung nach den Risiken für das Bauwerk und die Installationen, insbesondere für betroffene Aggregate und Leitungen des redundanten Sicherheitssystems. Zu diesem Zweck werden die bei den verschiedenen Projektteilnehmern entwickelten und/oder betriebenen Brandsimulationsprogramme – Mehrraum-Mehrzonen-Modelle oder Feldmodelle – angewendet und anhand der Ergebnisse von Berechnungen für sehr detailliert beschriebene Referenzaufgaben verglichen.

In der ersten Phase des Projektes sollten von den beteiligten Institutionen, soweit sie dazu in der Lage waren, mit den vorhandenen Brandsimulationsprogrammen mögliche Brandereignisse in einem für Kernkraftwerke typischen Gebäudeabschnitt bzw. einem einzelnen Raum untersucht werden. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde beim zweiten Arbeitstreffen im Juni 2000 ein Raum mit einer Kabelmassierung (Unterwartenraum, Rangierverteiler) festgelegt, wobei alle signifikanten Parameter fest vorgegeben wurden.

Dieser Raum ist 15,20 m tief, 9,10 m breit und 4,60 m hoch. Im Raum befinden sich eine Anzahl Steuer- und Leistungskabel für diverse Pumpen und Ventile, die zu einer redundanten Sicherheitsabschalteinheit gehören (Abb. 2.1). Die thermophysikalischen Parameter für die Umfassungsbauteile sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Die einzige Tür des Brandraums befindet sich in der Stirnwand. Diese Tür ist 2,40 m breit und 2,40 m hoch. Falls das anzuwendende Computerprogramm es erfordert, kann bei geschlossener Tür ein 5 mm dicker Spalt am Boden angenommen werden. Zusätzlich soll ein mechanisches Ventilationssystem vorhanden sein, das einen 5-fachen Luftwechsel (0,884 m³ s⁻¹) ermöglicht. Diese Luftmenge wird sowohl eingeblasen als auch abgesaugt. Die quadratischen Öffnungen befinden sich in der Mitte der beiden Seitenwände mit dem Mittelpunkt in 2,40 m Höhe. Es soll angenommen werden, dass die Luft direkt von außen angesaugt und auch wieder nach außen abgeblasen wird.

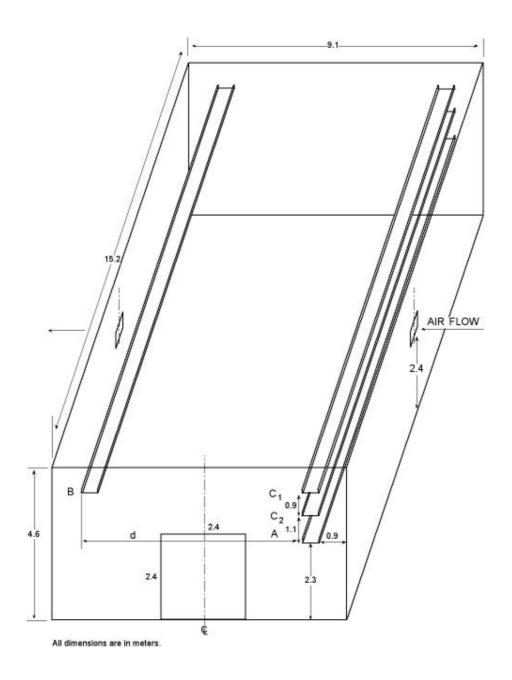


Abb. 2.1: Brandraum mit Öffnungen und Kabeltrassen

Die Kabeltrassen verlaufen über die gesamte Tiefe des Raums. Alle Trassen sind 60 cm breit und 8 cm hoch. Die Kabeltrasse A verläuft parallel zur rechten Seitenwand in einem Abstand von 90 cm. Sie befindet sich 2,30 m über dem Boden des Brandraums. Die Kabel der zweiten Redundanz liegen auf der Kabeltrasse B. Die Trassen A und B verlaufen in zwei unterschiedlichen Abschnitten mit einem horizontalen Abstand d. Direkt oberhalb von Trasse A befinden sich zwei zusätzliche Trassen, C1 und C2, mit kritischen und unkritischen Kabeln. Trasse C2 befindet sich 3,40 m, Trasse C1 4,30 m über dem Boden. Die thermophysikalischen Daten für die Kabel sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Es soll die Erwärmung eines einzelnen Leistungskabels mit einem Durchmesser von 50 mm untersucht werden. Dieses Referenzkabel (Target) verläuft entlang der linken unteren Kante von Trasse A bzw. der rechten unteren Kante von Trasse B. Diese Unterscheidung ist notwendig, weil im Teil A der Referenzaufgabe das Erwärmungsverhalten von Trasse A und in Teil B das von Trasse B betrachtet wird. Da viele Simulationsprogramme nur das Modell einer rechteckigen Platte beinhalten, kann das Referenzkabel entsprechend als 50 mm dicke Platte simuliert werden. Nur im Fall 13 von Teil 2 soll ein Steuerkabel mit einem Durchmesser von 15 mm vorgegeben werden.

Im ersten Teil der Aufgabenstellung wird ein Papierkorbbrand (Tabelle 2.3) vorgegeben. Die vorgegebene Energiefreisetzungsrate ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Der Papierkorb steht dabei auf dem Boden des Brandraums auf mittlerer Länge. Der horizontale Abstand zur Trasse A ist einer der zu variierenden Parameter der Berechnungen in Teil 1.

Im zweiten Teil wird ein Kabelbrand der Trassen A, C1 und C2 mit einer maximalen Energiefreisetzungsrate von 1 MW, 2 MW oder 3 MW mit einem quadratischen Anstieg (Abb. 2.3) angenommen. Die Kabelisolierung soll aus PVC bestehen. Die das Brandverhalten beschreibenden Parameter sind in Tabelle 2.4 zusammengestellt. Die Freisetzung von Verbrennungsprodukten wird mit Hilfe der angegebenen Ausbeuten berechnet.

Zusätzliche Parameter, z. B. Umgebungseigenschaften als Grundlage für den Gasaustausch über Ventilationsöffnungen, wurden - soweit es für verschiedene Computerprogramme notwendig war - unter den Projektteilnehmern abgestimmt.

Tab. 2.1: Thermophysikalische Eigenschaften der Umfassungsbauteile

Spezifische Wärmekapazität	1000 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit	1,75 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Dichte	2200 kg m <sup>-3</sup>
Emissionsvermögen	0,94
Dicke	0,152 m

# Tab. 2.2: Thermophysikalische Eigenschaften der Kabel (PVC)

Dichte	1710 kg m <sup>-3</sup>
spezifische Wärmekapazität	1040 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit	0,092 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Emissionsvermögen	0,8

Tab. 2.3: Angaben zum Papierkorbbrand

Durchmesser	0,49 m
Höhe	0,62 m
Strahlungsanteil der freigesetzten Energie	0,3
Verbrennungswärme	24,1 MJ kg <sup>-1</sup>

Tab. 2.4: Brandverhalten der Kabelisolierung

Chemische Formel	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl
Verbrennungswärme der Isolierung	16 MJ kg <sup>-1</sup>
Sauerstoff – Brennstoff Massenverhältnis	1,408 kg kg <sup>-1</sup>
Strahlungsanteil der freigesetzten Energie	0,48 kg kg <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub> - Ausbeute	0,46 kg kg <sup>-1</sup>
CO - Ausbeute	0,063 kg kg <sup>-1</sup>
HCI - Ausbeute	0,5 kg kg <sup>-1</sup>
Ruß-Ausbeute	0,172 kg kg <sup>-1</sup>
"Centerline" Temperatur für die Entzündung	643 K

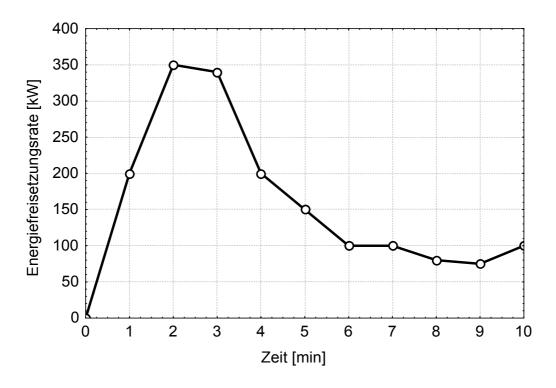


Abb. 2.2: Energiefreisetzungsrate des Papierkorbbrandes (Teil 1)

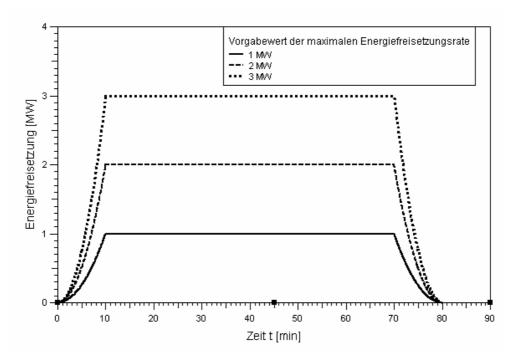


Abb. 2.3: Energiefreisetzungsrate des Kabelbrandes (Teil 2)

#### 2.2 Parametervariation

Im Teil 1 der Referenzaufgabe werden die Ausgangskonfiguration und fünf weitere Konfigurationen untersucht. Der horizontale Abstand zwischen dem Papierkorbbrand und Trasse A wird in den Konfigurationen 1 bis 3 variiert. Dies soll durch unterschiedliche Vorgaben der x- Koordinate des Papierkorbs bei fester Position der Trasse A geschehen. Die Untersuchung der Konfigurationen 4 und 5 soll die Einflüsse unterschiedlicher Ventilationsrandbedingungen (geöffnete Tür oder Betrieb des mechanischen Ventilationssystems) sichtbar machen. Tabelle 2.5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Konfigurationen für den ersten Teil.

Im Teil 2 der Untersuchung wird ein Kabelbrand der Trasse A vorgegeben. Mit den Konfigurationen 1 bis 8 wird der Einfluss der maximalen Energiefreisetzungsrate und des Abstands zwischen Brandherd (Trasse A) und Trasse B untersucht (Tabelle 2.6). In den Konfigurationen 9 und 10 werden von der Ausgangskonfiguration abweichende Ventilationsbedingungen betrachtet. Die Berechnungen zu den Konfigurationen 11 und 12 dienen zur Prüfung des Einflusses der vertikalen Position der Trasse B, und die Rechnungen zu Konfiguration 13 gelten dem Einfluss des Durchmessers des Referenzkabels auf Trasse B auf die Temperatur dieses Targets.

Tab. 2.5: Konfigurationen für Teil 1 der Referenzaufgabe

Konfiguration	Abstand zwischen Papierkorb und Trasse A	Ventilationsrandbedingungen
Ausgangs-	2,2 m	Tür geschlossen, mechanische Ventilation abgeschaltet
1	0,3 m	ventilation abgeschaltet
2	0,9 m	
3	1,5 m	
4	2,2 m	Tür offen, mechanische Ventilation abgeschaltet
5	2,2 m	Tür geschlossen, mechanische Ventilation eingeschaltet

Tab. 2.6: Konfigurationen für Teil 2 der Referenzaufgabe

Konfiguration	Maximum der Energiefrei- setzungsrate	Abstand zwischen Trasse A und B	Ventilationsrand- bedingungen	Kabeldurchmesser und Höhe von Trasse B über Trasse A
Ausgangs-	1 MW	6.1 m	Tür geschlossen,	50 mm, 1,1 m
1		3.1 m	mechanische Ven-	
2		4.6 m	tilation abgeschaltet	
3	2 MW	6.1 m		
4		3.1 m		
5		4.6 m		
6	3 MW	6.1 m		
7		3.1 m		
8		4.6 m		
10	1 MW	6.1 m	Tür geschlossen, mechanische Ven- tilation einge- schaltet, > 15 min: Tür offen, mechanische Ven- tilation abgeschaltet Tür offen, mecha-	
			nische Ventilation eingeschaltet	
11			Tür geschlossen,	50 mm, 2.0 m
12			mechanische Ven-	50 mm, 0.0 m
13			tilation abgeschaltet	15 mm, 1,1 m

Für alle Konfigurationen sollen die Temperaturen im Brandraum und auf der Oberfläche des Referenzkabels ermittelt werden. Außerdem sollen der Sauerstoffgehalt im Brandraum und die Massenströme durch die Öffnungen bzw. durch das mechanische Ventilationssystem berechnet werden. Bei Verwendung eines Zonenmodells erhält man jeweils eine mittlere Temperatur für die obere Rauchgasschicht und die untere Kaltgasschicht sowie die Lage der Grenze für diese beiden Schichten. Für den Vergleich sollen die Ergebnisse von Feldmodellberechnungen nach festen Regeln derart umgesetzt werden, dass auch eine Grenzschicht bestimmt und darauf aufbauend eine mittlere Temperatur für das untere und das obere Volumen angegeben werden kann.

# 3 Benchmark-Rechnungen der GRS und des iBMB mit verschiedenen Arten von Brandsimulationscodes

Von deutscher Seite waren bisher im Rahmen der ersten Projektphase Fachleute der GRS und vom iBMB der TU Braunschweig beteiligt. Dabei wurden bei dem ersten Benchmark sowohl Zonenmodelle als auch komplexere Codes, wie das Lumped-Parameter Modell COCOSYS und verschiedene dreidimensionale CFD-Codes, von GRS und iBMB erprobt.

Aufgrund der Besonderheiten dieses Gemeinschaftsprojektes wurde vom iBMB nicht das selbstentwickelte Zonenmodell FIGARO, sondern das vom NIST (National Instituts of Standards and Technology) herausgegebene und international anerkannte Programm CFAST /JON 00, PEA 00, PEA 95/ in der aktuellen Version eingesetzt. Die Durchführung der Berechnungen und alle Ergebnisse für die Referenzaufgabe Nr. 1 sind im Rahmen des internationalen Gemeinschaftsprojektes ausführlich dargelegt und diskutiert worden.

Von der GRS wurden im Rahmen des ersten Benchmarks verschiedene Rechnungen mit dem Codesystem COCOSYS /KLH 00/ und dem dreidimensionalen CFD-Code CFX (/HET 01/, /HET 02/) durchgeführt.

Die dementsprechenden Ergebnisse zu dem ersten Benchmark wurden bereits in /DEY 01/ dokumentiert. Eine Veröffentlichung aller Ergebnisse des ersten Benchmarks im Rahmen der Phase I des "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for NPP Applications" ist von der USNRC in Form eines NUREG-Reports für 2002 geplant.

#### 3.1 Ergebnisse der COCOSYS-Rechnungen

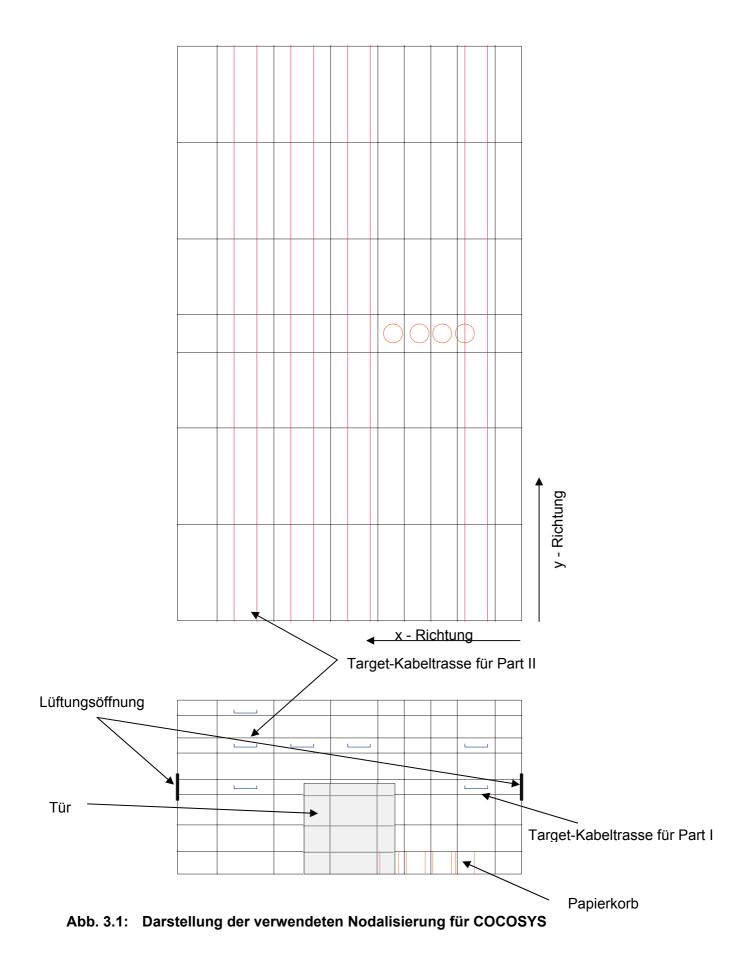
Im folgenden werden die Ergebnisse der Brandsimulationsrechnungen mit dem von der GRS entwickelten Lumped Parameter Codesystem COCOSYS kurz zusammengefasst.

## 3.1.1 Nodalisierung des Brandraumes

Für die Simulation wurde der Brandraum in zahlreiche Kontroll-Zonen aufgeteilt. Die Einteilung ist in Abb. 3.1 und Abb. 3.2 dargestellt. Es wurde eine detaillierte Einteilung gewählt, um einerseits lokale Konvektionen berechnen zu können und andererseits, um alle Fälle, mit z.T. unterschiedlichen Positionen der Kabeltrassen, mit einer Nodalisierung rechnen zu können. Der Raumbereich um den Papierkorb wurde zur Simulation des Heißgas-Plumes besonders detailliert aufgeteilt. Insgesamt wurden 8 Ebenen (bezeichnet mit RA, RB, ...) spezifiziert. In der x-Richtung wurden die Zonen mit den Zahlen 1 bis 9 und in der y-Richtung mit den Buchstaben L bis Q bezeichnet. Die Ebenen A bis C wurden in 27 Zonen, die Ebenen D bis E in 37 und die oberen Ebenen F bis H in 56 Zonen aufgeteilt. Damit werden in den Rechnungen insgesamt 323 Zonen verwendet.

Für den ersten Teil des Benchmarks wurde der Papierkorb durch eine vorgegebene Wärmequelle simuliert. Da die Sauerstoffkonzentration hoch bleibt, hat diese keinen Einfluss auf die Verbrennung.

Im zweiten Teil des Benchmarks wird ein Brand der Kabeltrasse C2 angenommen. Durch die höhere Abbrandrate sinkt die Sauerstoffkonzentration entsprechend ab und beeinflusst damit die Verbrennung. Daher wurde in diesem Fall das 'einfache' Kabelbrandmodell verwendet (siehe auch /KLH 01/).



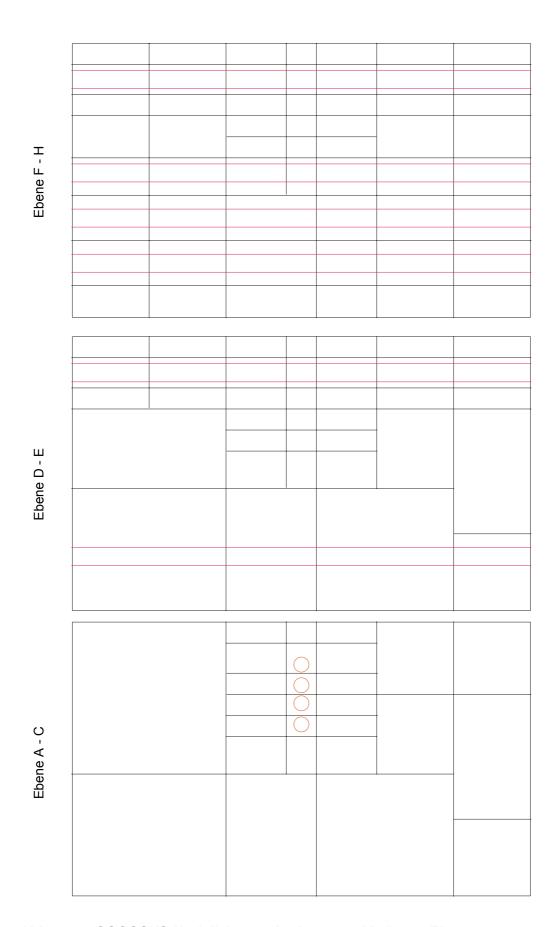


Abb. 3.2: COCOSYS-Nodalisierung in den verschiedenen Ebenen

## 3.1.2 Ergebnisse für Teil I

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Rechnungen zum Teil I kurz dargestellt. In diesem Teil wurde der Abstand zwischen der zu betrachteten Trasse (als Ziel) und dem Papierkorb (2.2 m, 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m) sowie in den Fällen 4 und 5 die Türstellung und das Lüftungssystem variiert. In den Abbildungen werden die verschiedenen Rechnungen mit p1bs für den Referenzfall und mit p1c1 bis p1c5 für die Variationsrechnungen bezeichnet

In Abb. 3.3 werden die berechneten Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke des Kabelraumes dargestellt. Je nach Abstand des Papierkorbs zum Zentrum sind die Temperaturen etwas unterschiedlich. Wie schon oben angedeutet, ist die Abbrandrate relativ gering, so dass die Sauerstoffkonzentration nur um ca. 1 Vol.-% sinkt. Von besonderer Bedeutung in diesem Benchmark ist das Verhalten der Target-Kabeltrasse. In Abb. 3.5 wird die Oberflächentemperatur des betrachteten Kabels dargestellt. Nur in der Rechnung mit 0.3 m Abstand zwischen Papierkorb und Trasse (in der Nodalisierung praktisch über dem Papierkorb) wird eine nennenswerte Temperatur an der Oberfläche berechnet. Zur Bewertung dieses Ergebnisses ist zu beachten, dass COCOSYS kein spezielles Plume-Modell verwendet, sondern das Verhalten aufsteigender heißer Gase über eine entsprechend feine Nodalisierung simuliert. Eine exakte Berechnung der Plume-Aufweitung mit steigender Höhe ist damit nicht möglich.

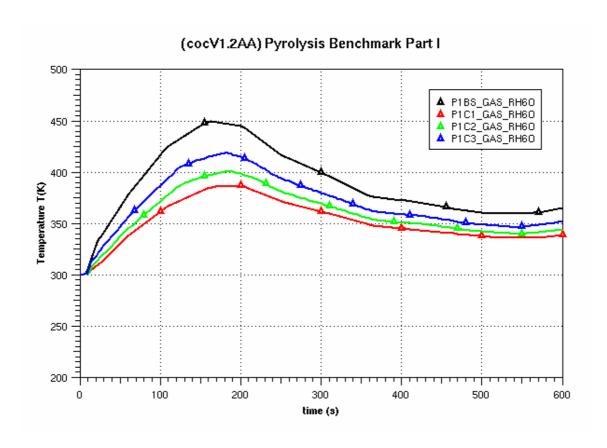


Abb. 3.3: Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke (Zone RH6O, Basisfall und Fall 1 bis 3)

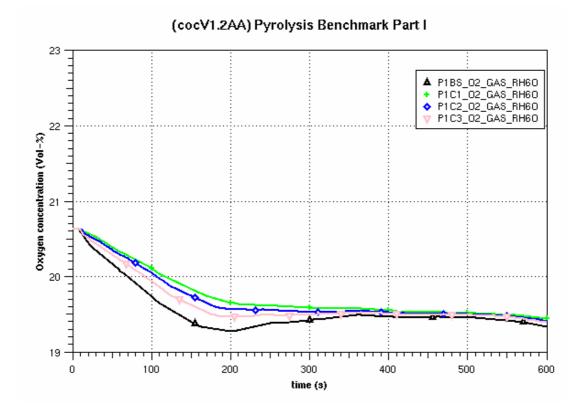


Abb. 3.4: Sauerstoffkonzentration im Zentrum unterhalb der Decke (Zone RH6O, Basisfall und Fall 1 bis 3)

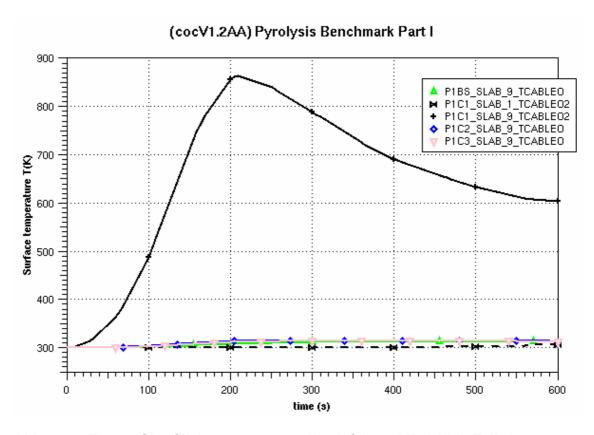


Abb. 3.5: Target-Oberflächentemperatur (Basisfall und Fall 1 bis Fall 3)

## 3.1.3 Ergebnisse für Teil II

Im zweiten Teil des Benchmarks wird der Einfluss brennender Kabeltrassen auf eine horizontal und vertikal versetzte Trasse untersucht. In den Legenden werden die verschiedenen Rechnungen mit p2bs für den Referenzfall und mit p2c1 bis p2c13 für die verschiedenen Variationsrechnungen verwendet. Da in diesem Fall die Sauerstoffkonzentration wesentlich niedriger ist, wurde für diesen Teil das einfache Kabelbrandmodell verwendet. Die Abbrandrate ist im Benchmark-Problem spezifiziert. Die tatsächliche Wärmefreisetzung wird aber durch den mangelnden Sauerstoff reduziert.

Im folgenden werden der Basisfall, die Fälle 5 und 8 mit veränderter Freisetzung und die Fälle 9 und 10 mit veränderten Ventilationsbedingungen näher beschrieben.

In Abb. 3.6 sind die berechneten Wärmefreisetzungen dargestellt. Schon nach kurzer Zeit (zwischen 500 und 1000 s) wird die Verbrennung durch den Sauerstoffmangel reduziert. Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die Temperaturen im Kabelraum (Abb. 3.7). Abb. 3.8 zeigt den Verlauf der Sauerstoffkonzentration. In der Abb. 3.9 sind die berechneten Oberflächentemperaturen und die Temperaturen im Kabelmittelpunkt dargestellt. Die Oberflächentemperaturen steigen schnell an, so lange noch Sauerstoff im Kabelraum vorhanden ist. Danach fallen diese Temperaturen wieder. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit (es wurde der Einfachheit halber nur PVC als Material spezifiziert) gleichen sich die inneren Kabeltemperaturen sich nur langsam an.

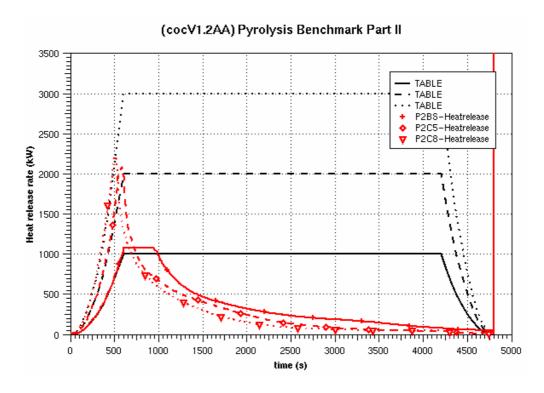


Abb. 3.6: Wärmefreisetzung (Basisfall, Fall 5, Fall8)

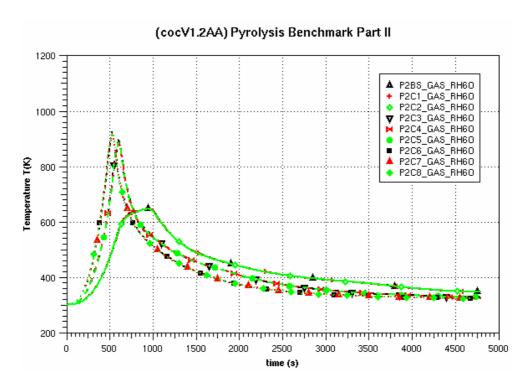


Abb. 3.7: Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke

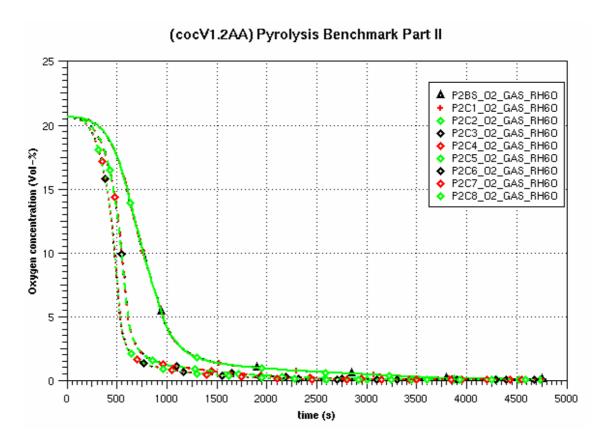


Abb. 3.8: Sauerstoffkonzentration

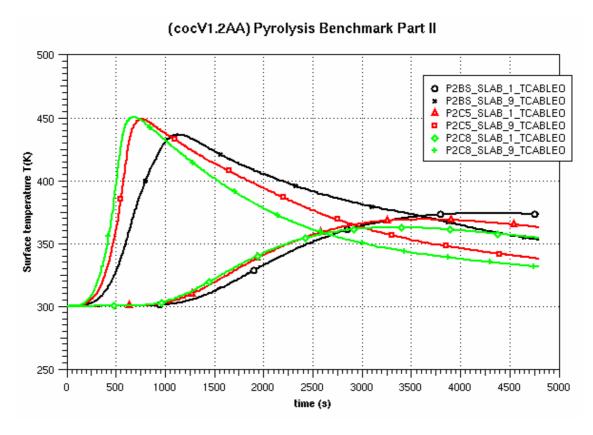


Abb. 3.9: Oberflächentemperatur des Targets

In den Fällen 9 und 10 wurden die Türen geöffnet bzw. die Lüftung betrieben. Dadurch sinkt die Sauerstoffkonzentration nicht so stark ab (Abb. 3.12). Entsprechend sind die Temperaturen im Kabelraum als auch die Oberflächentemperaturen des Targetkabels höher als im Basisfall (Abb. 3.11 und Abb. 3.13).

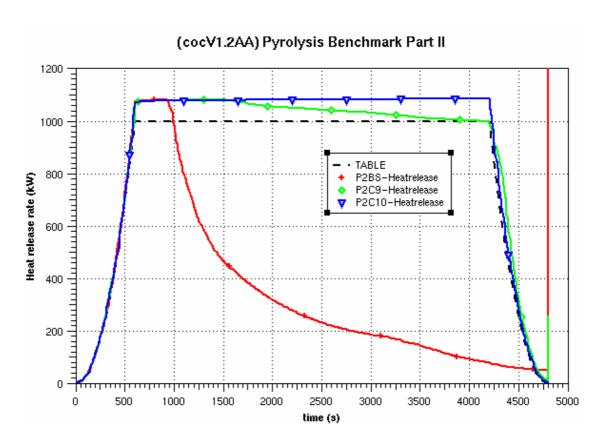


Abb. 3.10: Wärmefreisetzung (Basisfall, Fall 9, Fall 10)

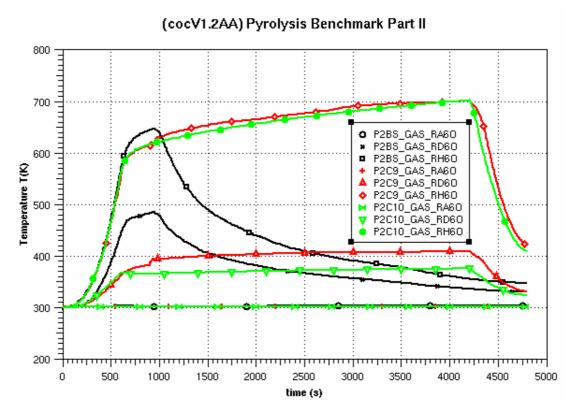


Abb. 3.11: Temperaturen im Zentrum unterhalb der Decke (Basisfall, Fall 9, Fall 10)

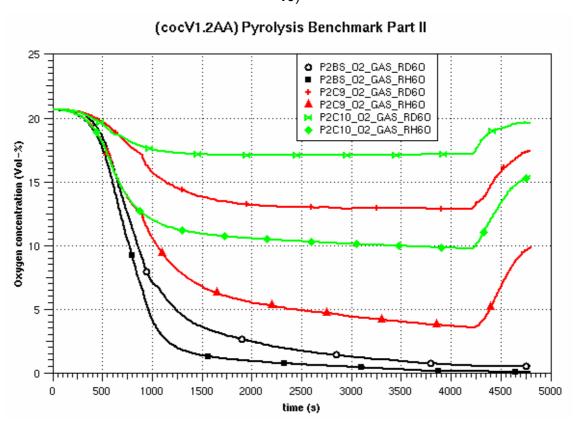


Abb. 3.12: Sauerstoffkonzentration (Basisfall, Fall 9, Fall 10)

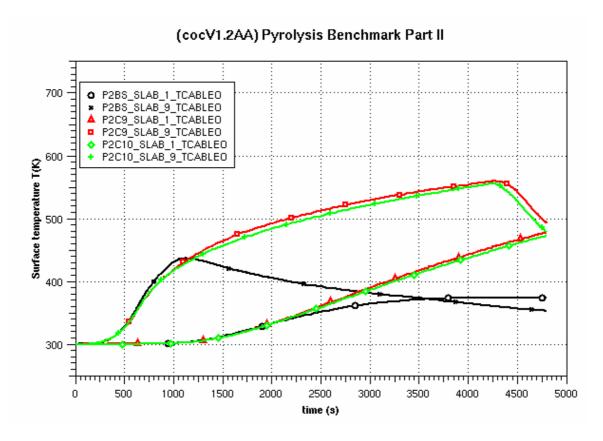


Abb. 3.13: Oberflächen- und Zentraltemperatur des Targets (Basisfall, Fall 9, Fall 10)

## 3.1.4 Schlussfolgerungen der COCOSYS-Rechnungen

Um die Fähigkeiten und die Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Brandsimulationsprogramme zu untersuchen, wurde im Rahmen des 'International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications' ein Benchmark durchgeführt. In diesem Benchmark wurde ein Kabelraum mit mehreren Kabeln betrachtet.

COCOSYS gehört zu den sogenannten Lumped-Parameter Programmen. Hierbei wird der betrachtete Raumbereich in sogenannte Kontrollvolumina (Zonen) aufgeteilt. Der thermodynamische Zustand einer Zone ist gegeben durch die mittlere Temperatur T und der Massen der betrachteten Komponenten (Gase und Wasser). Die Gasströmung zwischen verschiedenen Zonen wird mittels Impulsgleichung berechnet, wobei aber der Impuls nicht bilanziert wird. Eine detaillierte Nodalisierung des Kabelraums ist notwendig, um lokale Effekte und Konvektionen simulieren zu können.

Die Rechnungen ergaben in sich konsistente Ergebnisse, wobei die Einschränkungen des COCOSYS-Programms zu beachten sind. Bei diesen handelt es sich zum einen um die nicht vorhandene Plumemodellierung, so dass die Aufweitung des Plumes nicht berechnet werden kann, und zum anderen um die in Verbindung mit dem einfachen Kabelbrandmodell fehlende Berücksichtigung der Strahlung der Flamme.

Eine entscheidende Bedeutung hat für den Teil II die Sauerstoffkonzentration. Laut Benchmark sollte ein LOL-Wert von 12 Vol.-% verwendet werden. In den COCOSYS-Rechnungen wurde entsprechend der bisherigen Erfahrungen mit der Validierung des HDR-E41.7-Experiments ein Wert von 4 Vol.-% verwendet. Da der LOL-Wert einen erheblichen Einfluss auf die Rechenergebnisse hat, wurde der validierte Wert bevorzugt.

# 3.2 Rechnungen mit dem CFD-Code CFX

Im Rahmen des internationalen Gemeinschaftsprojektes zur Bewertung und Ertüchtigung von Brandsimulationsprogrammen für Anwendungen in Kernkraftwerken wurde seitens der GRS u.a. auch ein CFD-Modell CFX 4.4 /CFX 00/ für ausgewählte Fälle des Benchmarks eingesetzt. Dieses Programm verwendet ein blockstrukturiertes Gitter und ist in der Lage, relativ große Räume (Länge > 15 m) in Kombination mit sehr kleinen Strukturen (z.B. Kabel mit einem Durchmesser von 0.05 m) zu modellieren. In diesem Zusammenhang relevante Eigenschaften des Programms sind:

- Mehrkomponenten-Gemische (Simulation von Brandgasen),
- turbulente Strömungen (k- Modell),
- Simulation der thermischen Strahlung zwischen Wand und Gaskomponenten,
- Wärmeleitung in den Strukturen (inklusive der Targetkabel).

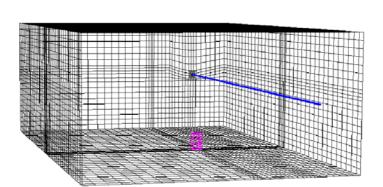
Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse sind detailliert in /DEY 01/, /HET 01/ beschrieben.

#### 3.2.1 Ergebnisse für Teil I - Basisfall

In diesem Fall wird ein Papierkorbbrand am Boden in einem geschlossenen Kabelraum (bis auf eine kleine Leckage von 0.012 m² am Boden im Türbereich) angenommen

(Abb. 3.14). Die Branddauer beträgt ca. 10 Minuten und erreicht ein Maximum bei 350 kW nach ca. 2 Minuten. Das Targetkabel befindet sich 2.3 m über dem Boden. Der Abbrand wird durch eine Wärmefreisetzung in den Zellen in der Nachbarschaft des Papierkorbs simuliert. Eine vordefinierte Energie-Freisetzung durch Strahlung (Strahlungsanteil der Flamme) wird durch eine angepasste Oberflächentemperatur des Papierkorbs modelliert, wobei dann der Wärmeaustausch durch Konvektion unterdrückt wird. Der Wärmeübergang an die umgebenden Wände wird berücksichtigt. Der Wärmeaustausch durch thermische Strahlung wird über eine Monte-Carlo-Simulation mit 80000 Tests berechnet.

Abbildung 3.15 zeigt die Temperaturverteilung in einem Schnitt durch den Papierkorb. CFX berechnet eine Stratifikation der Temperaturen, obwohl die Wärmefreisetzung relativ niedrig ist. Die Sauerstoffkonzentration bleibt aufgrund der kurzen Branddauer hoch genug, so dass diese den Brandverlauf nicht beeinflusst. Daher wird der Sauerstoffgehalt in dieser Rechnung nicht berücksichtigt. Aufgrund der niedrigen Abbrandraten bleiben die Temperaturen am Targetkabel niedrig.



Cable Tray Fires of Redundant Safety Trains

Benchmark Part I

Abb. 3.14: Modellierung des Kabelraums mit Papierkorb

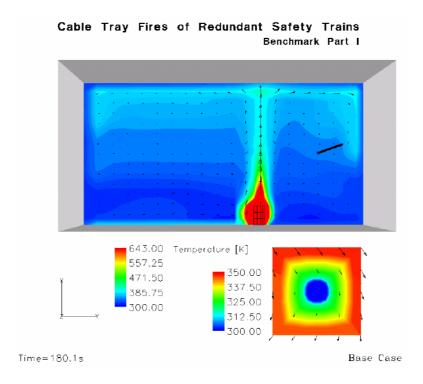


Abb. 3.15: Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der höchsten Wärmefreisetzung (#1, Basisfall)

## 3.2.2 Ergebnisse für Teil I - Fall 5

In diesem Fall wird die Ventilation an den Seitenflächen des Kabelraums betrachtet (Abb. 3.16). Die Zuluft ist konstant bei ca. 0.44 m/s (oder 5 Luftwechsel pro Stunde). Alle anderen Randbedingungen und Modelle sind wie im Basisfall. Der Zustrom von kalter Luft aus der Umgebung reduziert die Temperatur um das Target. Dies wird durch den Vergleich der Targetumgebung (vergrößerte Darstellung in Abb. 3.15 und Abb. 3.17) deutlich.

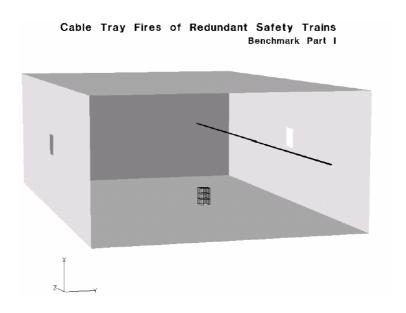


Abb. 3.16: Brandraum mit Ventilationsöffnungen (Fall 5)

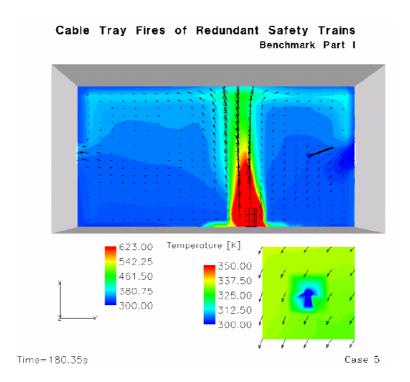


Abb. 3.17: Temperaturfeld unter ventilierten Bedingungen (#1, Fall 5)

Der Brand wird durch die Ventilation nicht beeinflusst, da in beiden Fällen genügend Sauerstoff zur Verfügung steht. Die Erwärmung des Targets ist vergleichsweise niedrig, ähnlich wie im Basisfall.

## 3.2.3 Ergebnisse für Teil II - Basisfall

Im zweiten Teil des Benchmarks wird ein Brand dreier Kabeltrassen (zusammengefasst zu einer Trasse) im rechten Raumbereich angenommen. Die Fragestellung ist nun, inwieweit ein anderes Kabel mit einem vorgegebenen Abstand durch diesen Brand beeinträchtigt wird. In Abbildung 3.18 wird das verwendete Gitter dargestellt. Wie im Teil I wurde der Kabelbrand durch eine Wärmeeinspeisung simuliert. Da die Problemzeit auf 80 min erweitert wurde, musste das Gitter auf 28400 Zellen reduziert werden. Die Abbildung zeigt auch die möglichen Öffnungen (gelbe Flächen) in den verschiedenen Fällen.

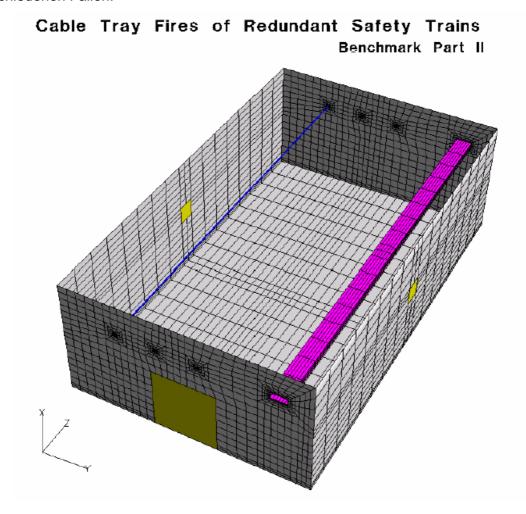


Abb. 3.18: Gittermodell für die Simulation des Kabelbrands (Part II)

Die maximale Wärmefreisetzung beim Kabelbrand ist im Vergleich zum Teil I ca. 3 bis 9 mal höher (1 bis 3 MW). Zusätzlich reduziert sich im geschlossenen Fall (Basisfall) die Sauerstoffkonzentration stark. Dieser Umstand wurde in der CFX-Simulation berücksichtigt. Es wurden insgesamt 3 Spezies definiert: Stickstoff als Hintergrundfluid,

Sauerstoff und die Reaktionsprodukte (CO<sub>2</sub> und HCI). Entsprechend der Spezifikation des Benchmark-Problems, berechnet CFX aus der vorgegebenen Wärmefreisetzungskurve den Sauerstoffverbrauch und die Freisetzung von Reaktionsprodukten. Wenn die Sauerstoffkonzentration in den Zellen um das Kabel den vorgegebenen LOL-Wert von 12 Vol.-% unterschreitet, wird die Wärmefreisetzung sowie die Massenumsetzung in diesen Zellen unterdrückt. Der Strahlungsanteil ist mit 48 % festgelegt und wird analog zum Teil I berechnet.

Die maximale Wärmefreisetzung beträgt 1 MW für den Basisfall. Bis auf eine Leckage ist der Brandraum geschlossen. Der Sauerstoff um das brennende Kabel herum ist nach ca. 1400 s bereits verbraucht und begrenzt ab diesem Zeitpunkt die Reaktion. Diese Situation ist in Abbildung 3.19 dargestellt. Die Abbildung zeigt einen Schnitt durch die Mitte des Kabelraums. Die Sauerstoffkonzentration ist überall relativ niedrig, um das Kabel liegt sie nahe dem vorgegebenen LOL-Wert. Im unteren Raumbereich ist die Sauerstoffkonzentration durch die Leckage etwas höher, während im oberen Bereich dagegen die Konzentration der Brandgase (CO<sub>2</sub> und HCI) höher ist.

Durch den Sauerstoffmangel geht mit zunehmender Zeit die Wärmefreisetzung zurück, wodurch der Druck im Brandraum unterhalb den Atmosphärendruck sinkt. Damit strömt Kaltluft über die Leckage in den Brandraum. Dies erhöht langsam die Sauerstoffkonzentration und somit wiederum den Abbrand. Dieser Ablauf wird in den beiden Abbildungen 3.20 und 3.21 dargestellt. Dies führt zu einem oszillierenden Verhalten bis zum Ende der Simulation (rote Kurve in Abb. 3.23).

## 3.2.4 Ergebnisse für Teil II - Fall 10 mit Ventilation

Die Situation ändert sich erheblich unter ventilierten Bedingungen (ähnlich zum Fall 5 im Teil I). Hier strömt Kaltluft in den rechten Bereich des Kabelraums nahe der brennenden Kabel. Durch den durch den Brand erzeugten Auftrieb strömt Gas aus dem unteren Teil des Raumes ständig aufwärts, wodurch Frischluft zum brennenden Kabel strömt (kein Sauerstoffmangel). Die Wärmefreisetzung entspricht praktisch der vorgegebenen Kurve (Abb. 3.23).

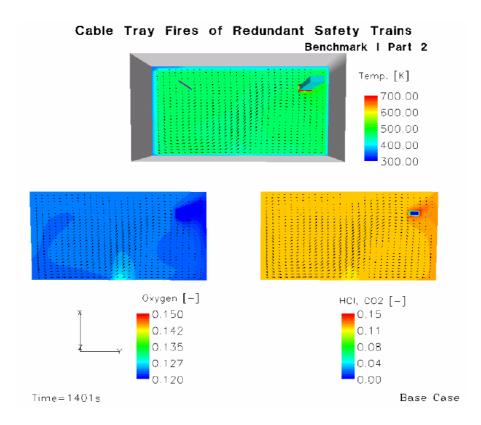


Abb. 3.19: Gaskonzentrationen kurz vor Eintritt von Sauerstoffmangel (#2, Basisfall)

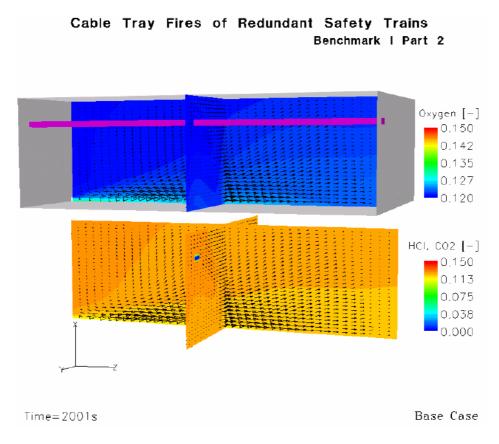


Abb. 3.20: Zustrom von Kaltluft (#2, Basisfall)

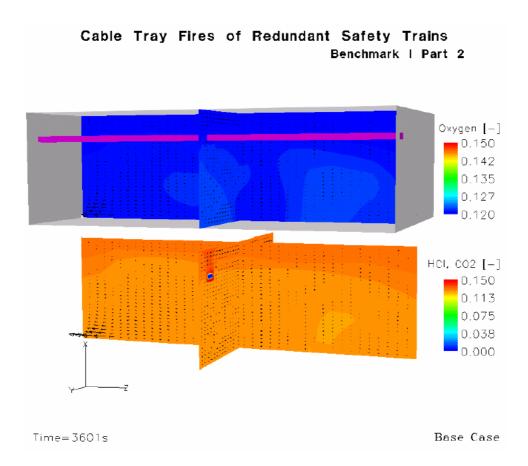


Abb. 3.21: Abströmen von Brandgasen aus der Leckage (#2, Basisfall)

Für diesen Fall wird eine ausgeprägte Stratifikation berechnet. Als Beispiel wird die Sauerstoffkonzentration in Abbildung 3.22 dargestellt. Diese behindert aber nicht die Sauerstoffzufuhr in den oberen Raumbereich in der Nähe der brennenden Kabeltrasse.

In der Abbildung 3.24 ist die Oberflächentemperatur des Targetkabels dargestellt. Durch den Sauerstoffmangel ist die Temperatur im Basisfall wesentlich niedriger.

Weitere Einzelheiten zu den Rechnungen des Benchmarkproblems sind in /HET 02/dokumentiert worden.

## Cable Tray Fires of Redundant Safety Trains Benchmark | Part 2

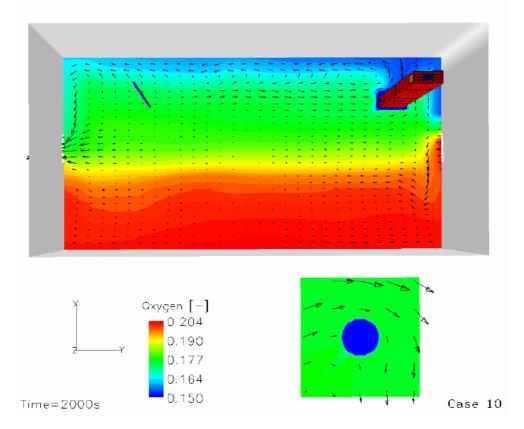


Abb. 3.22: Zustrom von Kaltluft über die Ventilation (#2, Fall 10)

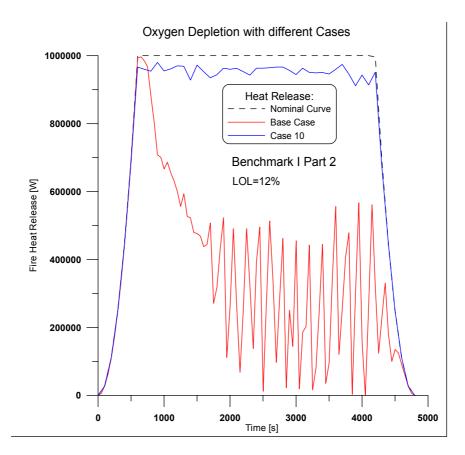


Abb. 3.23: Wärmefreisetzung der berechneten Fälle des Teil II

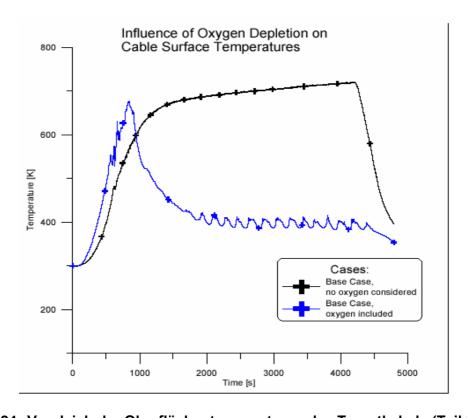


Abb. 3.24: Vergleich der Oberflächentemperaturen des Targetkabels (Teil II)

### 3.3 Ergebnisse der Rechnungen mit dem Zonenmodell CFAST

Es werden nachfolgend nur ausgewählte Ergebnisse der Berechnungen dargestellt, anhand derer die Fähigkeiten aber auch die Einschränkungen eines Mehrraum-Mehrzonen-Modells (CFAST 4.0.1) aufgezeigt werden.

Da es bei dem vom iBMB angewendeten Brandsimulationsprogramm (CFAST 4.0.1) /PEA 00/ nicht möglich ist, den Volumen- oder Massenstrom eines mechanischen Ventilationssystems zeitabhängig zu definieren, wurde die Konfiguration 9 des zweiten Teils zum einen mit eingeschalteter (Konfiguration 9a) und zum anderen mit abgeschalteter mechanischer Ventilation (Konfiguration 9b) berechnet, wobei in beiden Fällen das Öffnen der Tür nach 15 Minuten simuliert wurde.

Das eingesetzte Brandsimulationsprogramm (CFAST 4.0.1) besitzt zwei verschiedene Möglichkeiten, die Erwärmung eines Gegenstandes bzw. Bauteils zu berechnen. Für alle Konfigurationen des ersten Teils wurde zum einen das "Target"-Modell, zum anderen das "Object"-Modell für die Berechnung der Oberflächentemperatur von Trasse Abenutzt. Da sich keinerlei Unterschiede ergaben, wurde für den zweiten Teil nur noch das "Object"-Modell zur Berechnung der Oberflächentemperatur von Trasse B benutzt.

Das Mehrraum-Zonenmodell CFAST 4.0.1 besitzt zwei verschiedene Abbrandmodelle: Bei dem "ungezügelten" (unconstrained) Feuer wird nicht überprüft, ob ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht. Daher wird bei Wahl dieses Algorithmus stets die vorgegebene Energiefreisetzungsrate simuliert. Beim "gezügelten" (constrained) Feuer wird hingegen die vorhandene Sauerstoffmenge überprüft und die Energiefreisetzungsrate bei Sauerstoffmangel reduziert. Um die Einflüsse des Abbrandmodells zu untersuchen, wurden alle Konfigurationen des ersten und zweiten Teils mit beiden Feuer-Algorithmen berechnet.

### 3.3.1 Rechenergebnisse für Teil I und II

Für die Ausgangskonfiguration sowie die Konfigurationen 1 bis 3 des ersten Teils ergeben sich identische Temperaturen für die obere und untere Gasschicht und die Umfassungsbauteile. Auch die tatsächliche Energiefreisetzungsrate und der Sauerstoffgehalt sind für die genannten Fälle gleich. Dies liegt daran, dass die Ventilationsrandbedingungen für diese Fälle nicht variieren. Überraschend ist allerdings, dass sich die Ver-

hältnisse in Abhängigkeit vom gewählten Abbrandmodell unterscheiden, obwohl die Energiefreisetzungsrate beim "gezügelten" Feuer nicht durch Sauerstoffmangel beschränkt wird. Dies ist um so verwunderlicher, da die maximale Rauchgastemperatur im einen Fall 357 K, im anderen Fall 381 K erreicht (Abb. 3.25), obwohl das Volumen in beiden Fällen nahezu identisch ist (Abb. 3.26). Bei der Betrachtung der Oberflächentemperatur der Umfassungsbauteile oder der Referenzkabel auf Trasse A (Abb. 3.27) zeigt sich, dass eine niedrige Rauchgastemperatur mit einer hohen Oberflächentemperatur ("ungezügeltem" Feuer) korrespondiert und umgekehrt. Bei näherer Betrachtung von Abbildung 3.27 fällt auf, dass mit zunehmendem Abstand zwischen Trasse A und dem Papierkorb die Oberflächentemperatur des Referenzkabels zunimmt, das Gegenteil wäre aber zu erwarten und wohl auch realistisch.

Der Einfluss unterschiedlicher Ventilationsbedingungen kann anhand der Ergebnisse der Berechnungen für die Ausgangskonfiguration und die Konfigurationen 4 (Tür offen) und 5 (mechanische Ventilation eingeschaltet) gezeigt werden. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass es anfangs bei der Simulation der mechanischen Zuluft (Konfiguration 5) Probleme gab. Daher wurde die maschinelle Zuluft mit einer Öffnung für natürliche Zuluft (Konfiguration 5b) simuliert.

Besteht die Möglichkeit eines Gasaustausches mit der Umgebung durch die offene Tür oder das eingeschaltete mechanische Ventilationssystem, dann wird eine niedrigere Temperatur in der Rauchgasschicht erreicht (Abb. 3.28). Erst zum Ende der Simulationszeit zeigen sich geringfügige Unterschiede in der Temperatur für die beiden Lüftungsvarianten. Erst die Betrachtung der Lage der Grenzschicht zwischen Kaltgas- und Rauchgasschicht zeigt auffällige Unterschiede: Durch das mechanische Ventilationssystem wird mehr Gas aus dem Brandraum herausgefördert, so dass die Grenzschicht höher liegt. Demzufolge ist die mechanische Entrauchung für dieses Beispiel effektiver als die natürliche Entrauchung durch die offene Tür. Ist die Tür offen oder das mechanische Ventilationssystem eingeschaltet, dann steigt die Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse A nicht mehr so stark an (Abb. 3.30).

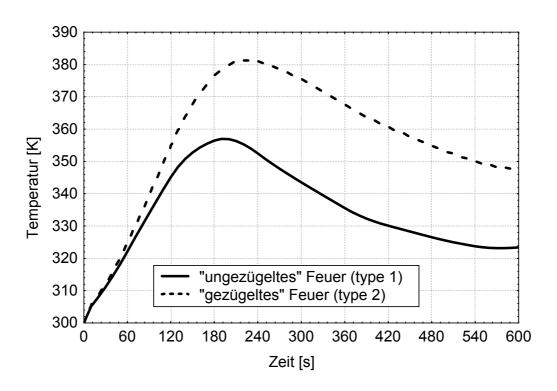


Abb. 3.25: Mittlere Rauchgastemperatur, Teil I, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 3

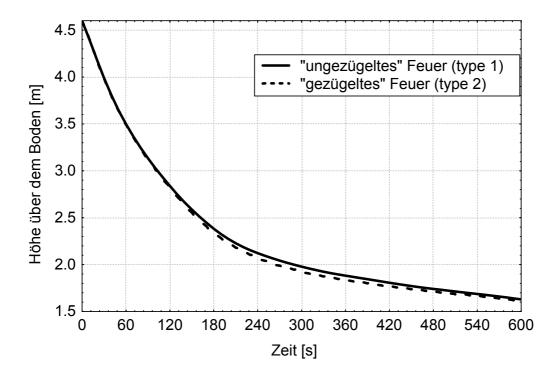


Abb. 3.26: Lage der Grenzschicht, Teil I, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 3

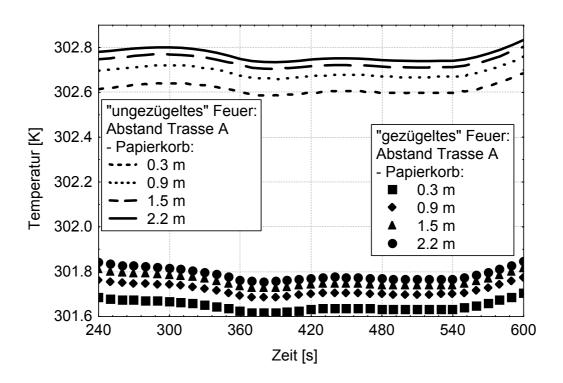


Abb. 3.27: Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse A, Teil I, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 3

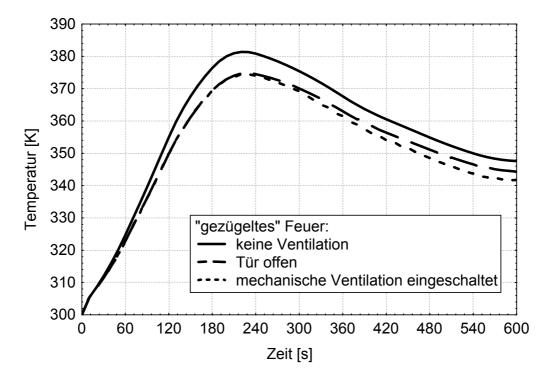


Abb. 3.28: Mittlere Rauchgastemperatur, Teil I, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 4 und 5

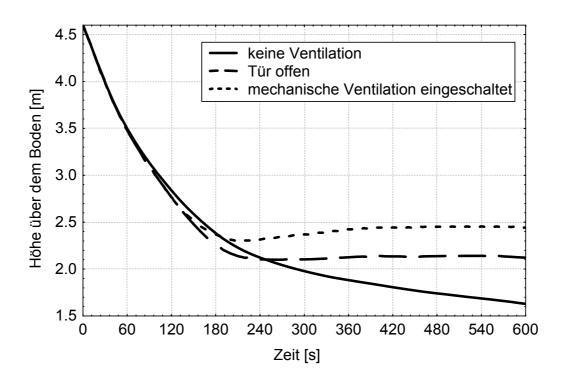


Abb. 3.29: Lage der Grenzschicht, Teil I, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 4 und 5

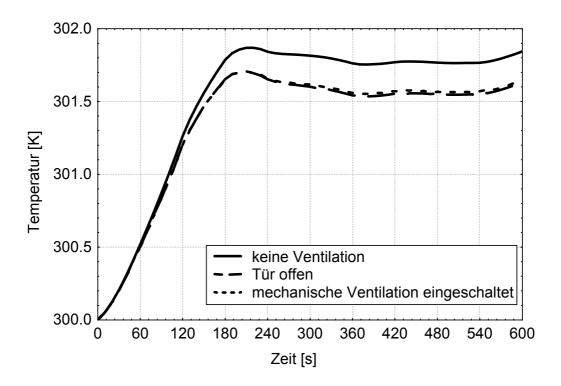


Abb. 3.30: Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse A, Teil I, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 4 und 5

Im Gegensatz zum Teil 1 wird die tatsächliche Energiefreisetzungsrate bei den Simulationsrechnungen für den Teil 2 erheblich durch das vorgegebene Abbrandmodell beeinflusst. Bei Anwendung des "ungezügelten" Feuers werden die vorgegebenen maximalen Energiefreisetzungsraten auch erreicht. Dagegen wird die Brandleistung bei Verwendung des "gezügelten" Feuers durch die Lage der Rauchgasschicht und deren Sauerstoffgehalt stark begrenzt (Abb. 3.31). Ohne Gasaustausch mit der Umgebung wird die stationäre Phase von 1 MW (Ausgangskonfiguration) zwar erreicht, nach kurzer Zeit bricht die Brandleistung aber ein. Eine maximale Brandleistung von ca. 1,3 MW wird in den beiden anderen Fällen (2 MW bzw. 3 MW) erreicht, bevor auch hier die Energiefreisetzungsrate rapide abnimmt. Das Öffnen der Tür bei abgeschaltetem Ventilationssystem beim "gezügelten" 1 MW - Feuer ist im Verlauf der Energiefreisetzungsrate durch einen sofortigen Abfall zu erkennen (Abb. 3.32). Ist das mechanische Ventilationssystem eingeschaltet, so bricht die Brandleistung wider Erwarten bereits zu einem früheren Zeitpunkt ein. Dabei ist es unwesentlich, ob die Tür geöffnet oder geschlossen ist. Dieses Verhalten erklärt sich bei Betrachtung der Lage der Grenzschicht (Abb. 3.36), die etwas tiefer liegt, wenn die mechanische Ventilation läuft und der Brandherd somit zu einem früheren Zeitpunkt in der sauerstoffarmen Rauchgasschicht liegt.

Da die Energiefreisetzungsrate bis zur 600. Sekunde bei Benutzung des "gezügelten" Feuers ohne Ventilation identisch verläuft, ist auch der Verlauf der mittleren Rauchgastemperatur (Abb. 3.33) und der Lage der Grenzschicht (Abb. 3.35) bis zu diesem Zeitpunkt gleich. Der Bruch tritt bei den beiden höheren Vorgaben für die Energiefreisetzungsrate (2 MW, 3 MW) nach 750 s auf. Nach Überschreiten dieses Zeitpunktes divergieren die Verläufe für die mittlere Rauchgastemperatur geringfügig, für die Lage der Grenzschicht aber erheblich.

Um den Einfluss der Ventilationsrandbedingungen zu erklären, müssen die verschiedenen Konfigurationen mit dem 1 MW – Feuer verglichen werden. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der mittleren Rauchgastemperatur (Abb. 3.34), so scheinen die Ventilationsrandbedingungen nur einen geringfügigen Einfluss zu haben. Offensichtlich ist aber, dass die mittlere Temperatur der Kaltgasschicht niedriger ist, wenn die Tür von Anfang an offen ist oder das mechanische Ventilationssystem arbeitet (Abb. 3.37). Auch kühlt die untere Gasschicht – genau wie die Rauchgasschicht – schlagartig ab, nachdem die Tür geöffnet wird. In diesem Fall ergibt sich auch ein Sprung im Verlauf der Lage der Grenzschicht (Abb. 3.36). Der Verlauf der Lage der Grenzschicht und der

mittleren Kaltgastemperatur sind für den Fall, dass die Tür von Anfang an offen ist oder erst nach 15 Minuten geöffnet wird, praktisch identisch, sofern die mechanische Ventilation während der gesamten Simulationsdauer aktiv ist.

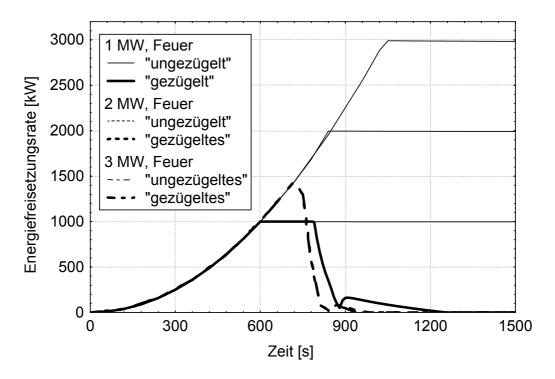


Abb. 3.31: Energiefreisetzungsrate, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 8

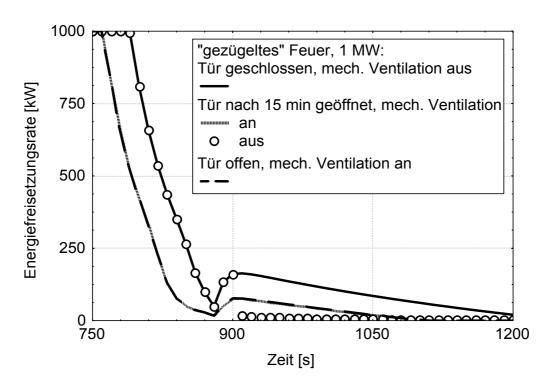


Abb. 3.32: Energiefreisetzungsrate, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 9a, 9b, 10

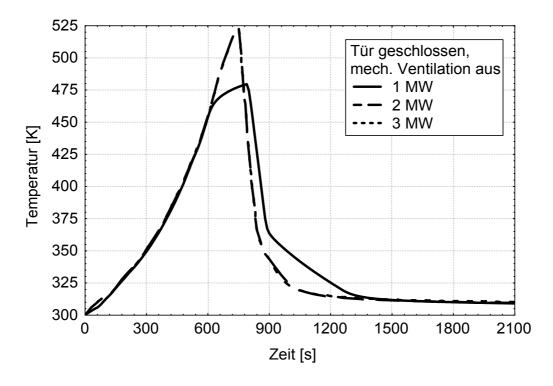


Abb. 3.33: Mittlere Rauchgastemperatur, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 8

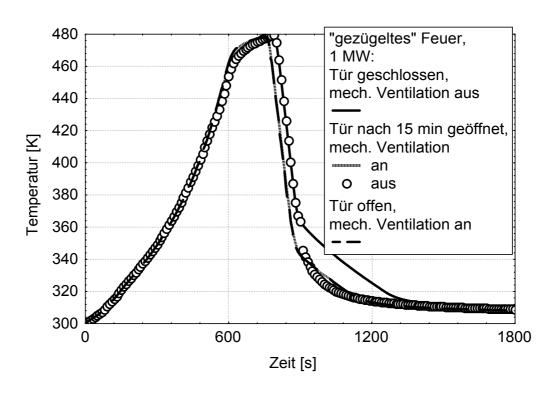


Abb. 3.34: Mittlere Rauchgastemperatur, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 9a, 9b, 10

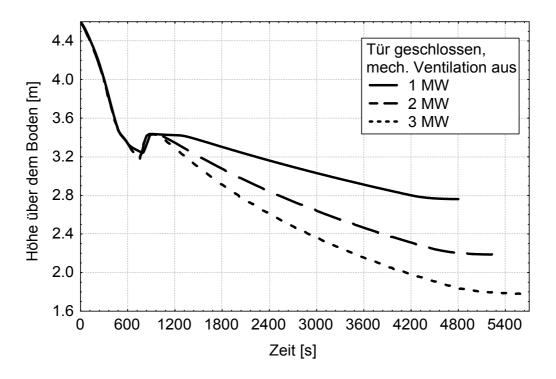


Abb. 3.35: Lage der Grenzschicht, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 1 bis 8

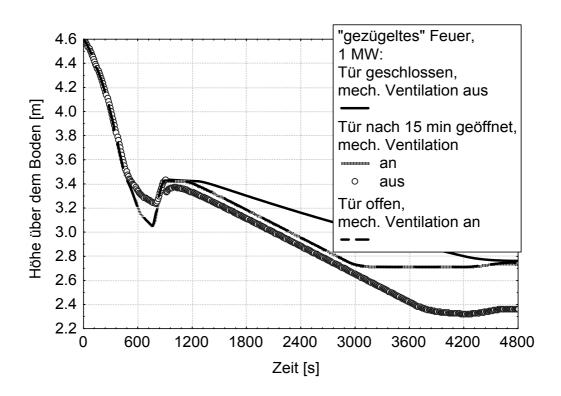


Abb. 3.36: Lage der Grenzschicht, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 9a, 9b, 10

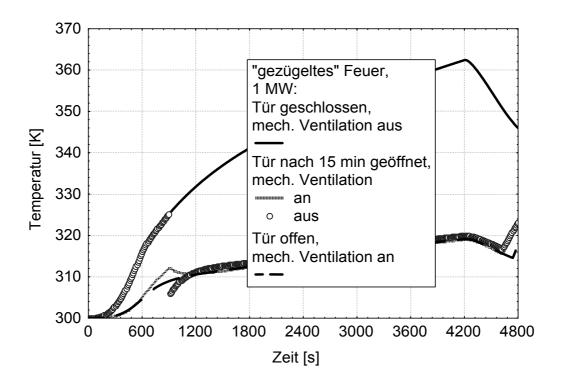


Abb. 3.37: Mittlere Temperatur der Kaltgasschicht, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 9a, 9b, 10

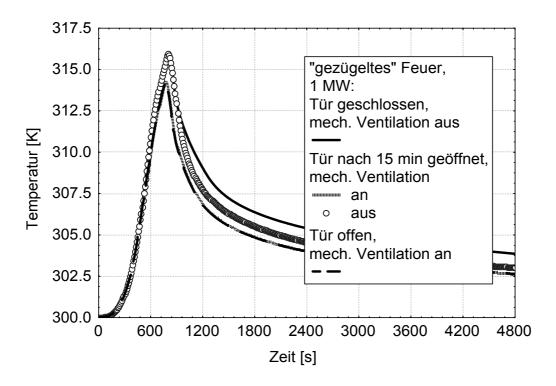


Abb. 3.38: Oberflächentemperatur des Referenzkabels auf Trasse B, Teil II, Ausgangskonfiguration, Konfigurationen 9a, 9b, 10

Wegen der Schwierigkeiten bei den Untersuchungen im ersten Teil des Benchmarks wurde beim zweiten Teil vorgegeben, dass die Trasse B in der Mitte des Brandraums lag und die y-Koordinate von Trasse A so variiert wurde, dass der horizontale Abstand D die entsprechenden Werte aufwies. Vorher wurde sichergestellt, dass eine Verschiebung in x-Richtung zu den gleichen Ergebnissen wie eine Verschiebung in y-Richtung führt. Es hat sich gezeigt, dass bei Verwendung des "gezügelten" Abbrandmodells der Abstand nur einen sehr geringen Einfluss auf die Oberflächentemperatur des Referenzkabels hat. Auch die Vorgabe unterschiedlicher maximaler Brandleistungen führt zu keinen großen Unterschieden bei der Erwärmung von Trasse B. Änderungen in den Ventilationsrandbedingungen führen nur zu Verringerungen der Oberflächentemperatur von maximal 1,8 K (Abb. 3.38).

# 3.3.2 Anwendungsgrenzen des Brandsimulationsprogramms CFAST Abbrandmodell

Als mit den Untersuchungen begonnen wurde, bestand die Annahme, dass die Ergebnisse von Simulationen unter Verwendung des "ungezügelten" oder ""gezügelten" Abbrandmodells keine nennenswerten Unterschiede aufweisen, solange kein Sauerstoff-

mangel auftritt. Tatsächlich traten aber in den Ergebnissen der Berechnungen im Teil I der Referenzaufgabe Unterschiede in der Rauchgastemperatur von bis zu 81 K auf, wobei unerwartet die höheren Temperaturen mit dem "gezügelten" Feuer berechnet wurden. Noch überraschender war es dann, dass bei den Oberflächentemperaturen die Verhältnisse umgekehrt waren: Mit dem "gezügelten" Feuer ergaben sich niedrigere Temperaturen. Sicherlich ließen sich diese Eigenheiten mit Besonderheiten bei Wärmeaustausch durch Strahlung erklären. Vermutlich wird bei der genaueren Beschreibung der Verbrennung mit dem "gezügelten" Feuer eine realistische Zusammensetzung der Rauchgasschicht simuliert. Dadurch erfolgt eine Strahlungsabsorption von Kohlendioxid und Wasserdampf, so dass sich die Rauchgasschicht stärker erwärmt, weniger Strahlung auf die Umfassungsbauteile trifft und diese sich weniger stark erwärmen. Sind die Ergebnisse der Brandsimulationsrechnungen für die Bauteilauslegung bestimmt, sollte demzufolge das Modell des "ungezügelten" Feuers benutzt werden, für die Dimensionierung von Rauch- und Wärmeabzugsmaßnahmen könnte das "gezügelte" Feuer besser geeignet sein. Der Anwender müsste also stets beide Modelle benutzen, die Ergebnisse vergleichen und - bezogen auf die Problemstellung das konservativere Modell wählen.

### Horizontale und vertikale Position eines "Targets" oder "Objects"

Zusätzliche Brandsimulationsrechnungen haben gezeigt, dass bei der Erwärmung eines Objekts (z. B. Referenzkabel) die horizontale oder vertikale Position im Brandraum keinerlei Einfluss auf die Oberflächentemperatur hat. Umgekehrt ergibt sich aber eine geringere Temperatur, wenn das eigentliche Feuer weiter aus der Brandraummitte in xoder y-Richtung entfernt wird. Daraus muss man schließen, dass bei dem verwendeten Brandsimulationsprogramm die Vorgabe von Object- oder Target- Koordinaten keinerlei Bedeutung hat oder das geometrische Modell fehlerhaft ist. Leider finden sich diesbezüglich keinerlei Hinweise in den Programmbeschreibungen, so dass einem unerfahrenen Benutzer fast zwangsläufig Fehlinterpretationen der Ergebnisse bezüglich der Oberflächentemperatur unterlaufen. Aus den Programmbeschreibungen geht nicht hervor, ob diese Erwärmungsmodelle in irgendeiner Form durch Versuchsergebnisse abgesichert sind.

#### Strom von außen in einen Brandraum mit mechanischer Ventilation

Zu Beginn wurde erwähnt, dass es Probleme bei der Simulation der mechanischen Zuluft gab. Diese lagen darin, dass bei der Brandsimulation mit mechanischer Zuluft der Sauerstoffgehalt in der Rauchgas- und in der Kaltgasschicht schnell abnahm, weil reiner Stickstoff in den Brandraum gepumpt wurde. (Diese Beobachtung wird von anderen Anwendern bestätigt.) In diesem Punkt hat das eingesetzte Computerprogramm offenbar einen Fehler, der aber nur auftritt, wenn das Modell "gezügeltes Feuer" benutzt wird.

In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass – im Gegensatz zu anderen Mehrraum-Zonenmodellen – bei dem hier eingesetzten Programm keine zeitabhängige Durchflussmenge bei mechanischer Ventilation vorgegeben werden kann. Damit kann in bestimmten Fällen sicherlich auch nicht die Effektivität von mechanischen Entrauchungsmaßnahmen beurteilt werden.

## 4 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Auf den ersten Blick erscheint die gewählte Referenzaufgabe (Benchmark) Nr. 1 des internationalen Gemeinschaftsprojekts zur Bewertung und Ertüchtigung von Brandsimulationsmodellen für Anwendungen in Kernkraftwerken verhältnismäßig einfach und in allen Details ausreichend beschrieben. Durch die umfangreichen Parametervariationen und die Verwendung verschiedener Sub-Modelle des Mehrraum-Zonenmodells CFAST wurden aber prinzipielle Schwachpunkte dieses Modelltyps sowie spezielle Unzulänglichkeiten des eingesetzten Computer-Programms offengelegt. Die Darstellung der Vorgehensweise und der Ergebnisse soll dem Anwender von Brandsimulationsprogrammen, insbesondere wenn ein vollständiges Verständnis für die physikalischen und mathematischen Grundlagen für die Lösung seiner Aufgabe nicht notwendig ist, deutlich machen, dass es nicht ausreicht, mit einem einzelnen Fall (einem Programmdurchlauf) die Lösung zu ermitteln, sondern durch Variation einzelner Parameter und Verwendung verschiedener Untermodelle auch die Bandbreite der Ergebnisse zu bestimmen.

Für die vorliegende Fragestellung der thermischen Belastung und eventuellen Zerstörung von sicherheitsrelevanten Aggregaten und Installationen in kerntechnischen Anlagen sind Mehrraum-Zonenmodelle sicherlich nicht optimal, da mit ihnen im Allgemeinen keine exakten Angaben zu thermischen Belastungen an bestimmten Punkten im Brandraum gemacht werden können. Auch können Strömungsvorgänge innerhalb eines Brandraums nur sehr grob (Heißgas-Plume, Ceiling-Jet) berechnet werden. Aber für die Berechnung von "globalen" Größen (durchschnittliche Temperaturen, Massenströme durch Verbindungsöffnungen), die für die Auslegung von Bauteilen oder Rauchabzugsmaßnahmen benötigt werden, sind Zonenmodelle sicherlich ausreichend. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber den sehr viel detaillierteren Feldmodellen besteht vor allem in der einfachen Bedienung, der schnellen Berechnung (Minuten im Vergleich zu Tagen) und der Übersichtlichkeit der Ergebnisse.

Das ebenfalls verwendete COCOSYS-Programm gehört zu den sogenannten "Lumped-Parameter" Programmen, in welchem der betrachtete Raumbereich in einzelne Kontrolvolumina unterteilt wird. Im Benchmark wurde der betrachtete Kabelraum in über 320 Kontrollvolumina aufgeteilt. Damit kann eine Schichtung und lokale Konvektionen berechnet werden. Durch COCOSYS wurden in sich konsistente Ergebnisse berechnet. Einschränkungen ergeben sich durch die fehlende Berechnung der Aufwei-

tung des Plumes und der fehlenden Berücksichtung der Strahlungswechselwirkung bei Verwendung des einfachen Kabelbrandmodells.

Mit Hilfe des Programms CFX sind sehr detaillierte Brandrechnungen möglich. Im Rahmen dieses Projekts wurde in der GRS erstmals CFX für diese Thematik eingesetzt. In den Rechnungen wurde die Sauerstoffkonzentration, wobei der vorgegebene LOL-Wert noch weiter validiert werden sollte, und die Strahlungswechselwirkung berücksichtigt. In einem nächsten Schritt sollten Experimente nachgerechnet werden, um die quantitative Belastbarkeit der Ergebnisse zu sichern. Gleichzeitig gilt es, die bisher noch nicht verwendeten Optionen zur Verbrennungssimulation, wie vermischungsabhängige Modellierung und Rußbildung, zu untersuchen. Optimierungen hinsichtlich der Qualität des Rechengitters und numerischer Einstellungen erscheinen ebenso sinnvoll.

In der GRS stehen damit Hilfsmittel auf drei verschiedenen Ebenen zur Verfügung: Mehrzonenmodell, Lumped-Parameter-Modell und 3D-Modell. Je nach Problemstellung kann daher das optimale Programm gewählt werden.

Die Teilnahme von deutschen Fachleuten auf dem Gebiet des analytischen Brandschutzes in Kernkraftwerken, insbesondere mit Schwerpunkt Brandmodellierung, an der ersten Aufgabenstellung der Projektphase I des "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for NPP Applications" hat sich als durchaus wertvoll für die Validierung von Brandsimulationsmodellen und -codes für eine Einbindung in zukünftige Brandschutzregelwerke für Kernkraftwerke nach Stand von Wissenschaft und Technik erwiesen. Im Rahmen dieses Projektes konnten mittlerweile erste wichtige Erkenntnisse zur Anwendbarkeit von Brandsimulationsmodellen und ihre möglichen Einschränkungen gewonnen werden, die für zukünftige Regelwerke und Leitfäden unerlässlich sein werden. Die Fortführung der Arbeiten wird von den bisher beteiligten Fachleuten für unabdingbar gehalten, um die Erprobung der Modelle in absehbarer Zukunft abschließen zu können und um den Transfer von Know-how zwischen Entwicklern und Anwendern der verschieden Programme zu verbessern. In weiterer Zukunft sollen die in diesem Projekt gewonnen Erfahrungen für eine Weiterentwicklung der Brandmodelle genutzt werden.

Die Ergebnisse der ersten Benchmark-Aufgabe werden bis Mitte 2002 von der USNRC in Form eines NUREG-Reports veröffentlicht und stehen damit einer breiten Fachöffentlichkeit zur Verfügung.

Die Fortsetzung der regelmäßig bisher etwa alle sechs bis sieben Monate durchgeführten Arbeitstreffen ist mit weiteren Arbeitstreffen, zunächst beim NIST in Gaithersburg, MD (USA) im Mai 2002 und dann bei BRE in Großbritannien im Oktober 2002 vorgesehen. Die Ergebnisse der weiteren Arbeiten in der Phase I des Projektes haben eine nicht unerhebliche Bedeutung für das Erreichen weiterer Fortschritte auf diesem Gebiet im Rahmen des bestehenden BMU-Vorhabens SR 2369 zum Brandschutz in Kernkraftwerken bzw. dessen Nachfolgevorhaben SR 2449. Für die Erzielung von möglichst gut abgesicherten und fachlich nach Stand von Wissenschaft und Technik untermauerten Ergebnissen sollten die Aktivitäten möglichst kontinuierlich entsprechend dem vorgesehenen Arbeitsplan der Expertengruppe fortgesetzt werden.

Im Hinblick auf die nächsten, in der ersten Projektphase vorgesehenen Aufgaben, das Benchmark-Exercise 2 und das Standardproblem (Standard Problem Exercise, SPE), haben sich auf Grund veränderter nationaler Prioritäten mit Bezug auf Brandschutz in Kernkraftwerken bei fast allen beteiligten Institutionen zeitliche Verzögerungen im Arbeitsplan ergeben. Entgegen der ursprünglichen Planung, die bereits erste Ergebnisse für das Exercise 2 bis Februar/März 2002 vorsah, sieht der geänderte Arbeitsplan nun vor, zwar die Experimente des NIST für das SPE wie vorgesehen Ende September 2002 durchzuführen, die Detailplanung dazu soll aber erst nach ersten sogenannten "Pre-Test-Calculations", also Vorab-Rechnungen zur Eingrenzung dieser Versuche bis zum nächsten Arbeitstreffen der Arbeitsgruppe im Mai 2002 vorgestellt und dort ausführlich diskutiert werden. Die endgültige Planung der Versuche zum Benchmark Exercise 2 soll dann bis Juli 2002 abgeschlossen sein.

Die "blinden" Vorausrechnungen der Versuche ohne Kenntnis der Versuchsergebnisse sollen bis September 2002 stattfinden, die Versuche dann - wie vorgesehen - im September 2002. Bis März 2003 können dann die Nachrechnungen dieser Brandversuche stattfinden, deren Daten im April 2003 an die Arbeitsgruppe zum Vergleich und anschließender Diskussion der Ergebnisse weitergegeben werden.

Erst dann kann entschieden werden, ob und in welchem Umfang weitere typische Brandszenarien mit den verfügbaren analytischen Programmen und Codes unterschiedlichen Typs modelliert werden sollen und welche weiteren begleitenden Brandversuche, wie beispielsweise großmaßstäbliche Kabelbrandversuche im Hinblick auf Funktionsausfälle elektrischer bzw. elektronischer Komponenten, dazu durchgeführt werden sollen. Erst wenn die erste Phase des Projekts bereits fast vollständig abgeschlossen ist, können die im Rahmen der zweiten Phase geplanten Arbeiten zur Wei-

terentwicklung und Anpassung derartiger Modelle erfolgen, woraufhin dann mit der Erarbeitung von Vorschlägen für die Einbindung derartiger Modelle in zukünftige Regelwerke zum Brandschutz in kerntechnischen Einrichtungen begonnen werden kann.

#### 5 Literatur

/DEY 01/ Dey, M. K.:

Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires, Dezember 2001, Draft Version

/DEY 01a/ Dey, M. K.:

International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Objectives and Status, Proceedings of 7<sup>th</sup> SMIRT Post Conference Seminar No. 1; held in conjunction with 16<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics In Reactor Technology, August 20-23, 2001, Waterford, CT, USA, November 2001

/HET 01/ Heitsch, M.:

CFX Simulations for the Benchmark Exercise #1 - Cable Tray Fires of Redundant Safety Trains, Technical Note, HET1/2001, 2001

/HET 02/ Heitsch, M.:

Containment Fire Simulation by a CFD Code, ICONE10 Conference, Paper 22467, Arlington, USA, 2002

/HOS 01/ Hosser, D.; Will, J.:

Referenzaufgabe Nr. 1: Kabelbrand im Rangierverteiler; Vorausrechnungen mit dem Mehrraum-Zonenmodell CFAST 4.0.1, Zwischenbericht im Rahmen des Vorhabens SR 2369: Überprüfung von Mehrraum-Zonenmodellen zur Nachweisführung und zur Ermittlung von Sicherheitsindikatoren für den Brandschutz in Kernkraftwerken, Mai 2001

/JON 00/ Jones, W. W.; Forney, G. P.; Peacock, R. D.; Reneke, P. A.: A technical reference for CFAST: An engineering tool for estimating fire and smoke transport. NIST TN 1431, Januar 2000

/KTA 00/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA):

Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 1: Grundsätze des Brandschutzes, KTA 2101.1, Fassung 12/00, Dezember 2000

/KTA 00a/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA):

Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 2: Brandschutz an baulichen Anlagen, KTA 2101.2, Fassung 12/00, Dezember 2000

/KTA 00b/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA):

Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 3: Brandschutz an maschinen- und elektrotechnischen Anlagen, KTA 2101.3, Fassung 12/00, Dezember 2000

/KLH 00/ Klein-Heßling, W.:

COCOSYS Calculations for Benchmark Exercise #1

Cable Tray Fires of Redundant Safety Trains, International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, TN-2-2000, Dezember 2000

/KLH 01/ Klein-Heßling, W. et.al.:

Brandgefahrenanalyse für den ausgewählten Raumbereich der Kabelräume unter der Warte des Kernkraftwerks Rowno, Block 3, GRS-A-2905, Februar 2001

/PEA 00/ Peacock, R. D.; Reneke, P. A.; Jones, W. W.; Bukowski, R. W.; Forney, G. P.A:

User's guide for FAST: Engineering tools for estimating fire growth and smoke transport. NIST Special Publication 921 2000 Edition, Januar 2000

/PEA 95/ Peacock, R. D.; Forney, G. P.; Reneke, P. A.; Portier, R. M.; Jones, W. W.: CFAST, the consolidated model of fire and smoke transport. NIST Technical Note 1299, September 1995

/WIL 01/ Will, J.; Hosser, D.:

Actual Results of Modeling Cable Fires in Nuclear Power Plants, Proceedings of 7<sup>th</sup> SMIRT Post Conference Seminar No. 1; held in conjunction with 16<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics In Reactor Technology, August 20-23, 2001, Waterford, CT, USA, November 2001