

Dipl.-Ing. Malte Zur

**Numerische Modellierung
der Kabinenluftströmung
und des Stofftransports von Gefahrgut
in Flugzeugfrachträumen**

Die vorliegende Arbeit entstand an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Impressum

**Numerische Modellierung
der Kabinenluftströmung
und des Stofftransports von Gefahrgut
in Flugzeugfrachträumen**

2015

Herausgeber:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0

Telefax: +49 30 8112029

E-Mail: info@bam.de

Internet: www.bam.de

Copyright © 2015 by

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Layout: BAM-Referat Z.8

ISSN 1613-4249

ISBN 978-3-9816668-8-5

Numerische Modellierung der Kabinenluftströmung und des Stofftransports von Gefahrgut in Flugzeugfrachträumen

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Malte Zur, geboren am 30.10.1975 in Ulm
aus Berlin

Promotionsausschuss:

Vorsitzender Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen

Gutachter Prof. Dr.-Ing. habil. Alfred Leder

Gutachter Prof. Dr.-Ing. habil. Nikolai Kornev

Gutachter Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm

Gutachter Dr.-Ing. Frank Otremba

Tag der Abgabe: 1. Oktober 2014

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19. Dezember 2014

Für meine Eltern.

Kurzfassung

Für den Transport flüssiger Gefahrgüter im Luftverkehr werden unter anderem Kunststoffverpackungen verwendet, die Leckagen aufweisen oder Permeation unterliegen können. Aufgrund der vorhandenen Belüftungsbedingungen ist eine Ansammlung entzündlicher oder gesundheitsschädlicher Gase im Frachtraum von Flugzeugen denkbar. Die Überschreitung ausreichender Konzentrationen solcher Gase kann zu einer Gefährdung führen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Kabinenluftströmungen und der Stofftransport von Gefahrgut in Flugzeugfrachträumen mittels CFD untersucht. Zunächst erfolgt die Entwicklung eines geeigneten numerischen Modells auf der Grundlage eines generischen Frachtraums mit typischen Merkmalen. Die verwendeten realitätsnahen Randbedingungen entsprechen aktuellen Flugzeugmustern. Das numerische Modell wird mittels experimenteller Modellversuche im Maßstab 1/10 validiert. Das Strömungsfeld im Frachtraummodell wird mittels eines LDA-Systems vermessen. Das validierte numerische Modell wird sowohl für Simulationen im Maßstab 1/10 als auch im Maßstab 1/1 verwendet. Anhand der drei Validierungskriterien Symmetrie, Verläufe und Beträge der betrachteten Strömungsgrößen und einer LDA-Spektralanalyse wird insgesamt eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation ermittelt. Eine systematische Untersuchung zeigt den Einfluss relevanter Parameter auf das Strömungsfeld und den Stofftransport. Zunächst werden die Einlassreynoldszahl und der Einlassturbulenzgrad sowie die Wandrauigkeit und Wandunebenheit bewertet. Für kleine Reynoldszahlen werden hohe Konzentrationen und für größere Reynoldszahlen werden deutlich geringeren Konzentrationen von Gefahrgut ermittelt. Anhand einer Variation in vier Schritten wird der Einfluss des Einlassmassenstromverhältnisses α aus Luft und Gefahrgut bewertet. Erst für Werte von $\alpha < 1000$ lässt sich ein signifikanter Einfluss feststellen. Es werden die Stoffe Toluol und n-Hexan beispielhaft für brennbare Gefahrgüter der Klasse 3 verwendet. Der Einfluss der Position und Gestalt verschiedener Einlassquellen wird an vier realitätsnahen Quellentypen bewertet. Anhand vier verschiedener Transportszenarien wird die Ausbreitung von Gefahrgut im Modellmaßstab untersucht. Die Szenarien unterscheiden sich durch die Art der Belüftung und durch die Dauer des Gefahrgutaustritts. Szenarien mit aktiver Frachtraumbelüftung sind als eher unkritisch zu beurteilen. Die betrachteten Szenarien ohne aktive Frachtraumbelüftung sind als gefährlich einzustufen. Insbesondere das Szenario mit zeitlich unbegrenztem Gefahrgutmassenstrom erreicht kritische Konzentrationswerte und eine kritische Ausdehnung der Gefahrgutansammlung im Frachtraum. Diese Ergebnisse werden anhand zweier Szenarien im Maßstab 1/1 bestätigt. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag, das Verständnis der Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Flugzeugfrachtraum beim Transport von Gefahrgütern im Luftverkehr zu erweitern, um Risiken im Luftverkehr zu identifizieren. Die Allgemeingültigkeit und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Flugzeugmuster und Flugszenarien mit komplexeren Details sind zu prüfen.

Abstract

Liquid dangerous goods are regularly transported as air freight in commercial aircrafts. Using plastic jerrycans or plastic containers, liquids or gases can escape by leakage or permeation effects. The specific ventilation situation in the aircraft cargo compartment may lead to agglomerations of potentially flammable or harmful gas-air mixtures in the cargo compartment. Exceeding certain concentration limits of such gases may cause dangerous situations. This work presents a CFD study of the cabin air flow and the mass transport of dangerous goods in the cargo compartments of commercial airplanes. In a first step, an adequate numerical model is developed that utilizes a generic aircraft cargo compartment with typical characteristics. The realistic boundary conditions are based on modern types of aircrafts. The numerical model is validated by model experiments in 1/10 scale. As a second step, the flow field in the cargo compartment is determined using a LDA-system. The validated numerical model is employed for simulations in 1/10 and 1/1 scale. Using three validation criteria (the symmetry, the evolution and values of flow variables and a LDA spectral analysis) a good qualitative and quantitative agreement between experiment and simulation is found. As a next step, a systematic analysis of relevant parameters influencing the flow and the mass transport in the cargo compartment is conducted. The influence of the inlet Reynolds number and the inlet turbulence intensity as well as the wall roughness and geometric obstructions on the wall are evaluated. For low Reynolds numbers, high concentrations are found and for higher Reynolds numbers, significantly lower concentrations of dangerous goods are calculated. The influence of α , the ratio of air and dangerous good flowing into the domain is evaluated using four different values of α . Only values of $\alpha < 1000$ show a significant influence on the concentration levels in the domain. The dangerous substances toluene and hexane are used as examples for class 3 flammable dangerous goods. The influence of the position and the shape of different inlet sources for dangerous goods are evaluated using four different types of sources. In a final step, four different transport scenarios are used to simulate and evaluate the expansion and propagation of dangerous goods in the generic cargo compartment in the model scale 1/10. The scenarios differ in the ventilation situation and the duration of the mass of dangerous goods entering the domain. Scenarios with an active cargo compartment ventilation are found to be noncritical. Scenarios without an active ventilation lead to critical concentrations of dangerous goods. In particular, a scenario with an indefinite mass inflow of a dangerous gas shows critical concentration levels and a critical expansion in the cargo compartment. These findings are confirmed by simulations of two different scenarios in a 1/1 scale.

The presented work contributes to a better understanding of the cabin air flow and the mass transport of dangerous goods in aircraft cargo compartments in order to identify potential risks. The universal validity and the transferability of the findings to other, more complex aircraft cargo compartments and transportations scenarios are to be reviewed in further research.

Vorwort

Im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in der Fachgruppe „Gefahrgut tanks und Unfallmechanik“ entstand die vorliegende Dissertation. Allen ehemaligen Kollegen der BAM, die zur erfolgreichen Erstellung dieser Forschungsarbeit beigetragen haben, möchte ich hiermit meinen Dank aussprechen.

Herrn Dr.-Ing. Frank Otremba danke ich für die Vorbereitung des thematischen Rahmens und die organisatorische und fachliche Unterstützung während der Erstellung der Arbeit. Herrn Dr.-Ing. Anton Erhard gilt mein Dank für die finanzielle Unterstützung meines Vorhabens und der Möglichkeit, diese in seinem Bereich durchführen zu können. Meinem Mitstreiter Herrn Dr.-Ing. Alexander Klippel danke ich für die anregenden fachlichen Diskussionen zum Thema und seiner wertvollen Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit an der Universität Rostock gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Alfred Leder. Seine Hinweise und fachlichen Anregungen waren für den Erfolg dieser Arbeit maßgeblich.

Meinem engsten Freund Herrn Dr.-Ing. Fabian Grasse bin ich für seinen fachlichen Rat in allen Belangen und seine unermüdliche Unterstützung in ganz besonderem Maße dankbar. Non scholae, sed vitae discimus!

Mein größter Dank gilt meiner Frau Sugely. Nur durch Ihr Verständnis war die erfolgreiche Durchführung dieses Vorhabens möglich. Nicht nur in schwierigen Zeiten war ihre Unterstützung unersetzlich. Gracias mi vida!

Berlin, im Januar 2015

Malte Zur

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Vorgehen und Zielsetzung	4
1.3	Stand der Forschung	6
2	Transport gefährlicher Güter im Luftverkehr	9
2.1	Gefahrguttransport	9
2.1.1	Vorschriften	9
2.1.2	Gefährliche Güter.....	10
2.1.3	Verpackungen	11
2.2	Klimatisierung der Flugzeugkabine	13
2.2.1	Kabinenaufbau	13
2.2.2	Belüftung.....	15
2.3	Permeation.....	18
2.3.1	Permeation aus Kunststoff-Verpackungen.....	19
2.3.2	Ermittlung von Permeationsraten	19
2.4	Leckage	22
2.4.1	Leckage aus Kunststoff-Verpackungen	22
2.4.2	Ermittlung von Leckageraten	23
2.5	Gemischbildung	24
2.5.1	Explosionsgefährdung.....	24
2.5.2	Zündgrenzen.....	25
2.5.3	Analytische Bestimmung von Massenströmen.....	25
2.6	Transportbedingungen.....	27
2.6.1	Umgebungsbedingungen.....	28
2.6.2	Flugdauer	29
2.6.3	Beladung	29
2.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	30
3	Methoden	33
3.1	Numerische Strömungsberechnung	33
3.1.1	Grundgleichungen	33
3.1.2	Modellierung turbulenter Strömungen.....	35
3.2	Validierung numerischer Simulationen.....	39
3.2.1	Modellversuche.....	40
3.2.2	Frachtraummodell.....	42
3.2.3	Versuchsaufbau	43
3.2.4	Laser-Doppler-Messsystem.....	45
3.2.5	Versuchsdurchführung	47
3.2.6	Bewertungsgrößen	50
3.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	53
4	Modelle	55
4.1	Numerisches Modell.....	55
4.1.1	Geometrie.....	55
4.1.2	Randbedingungen.....	56

4.1.3	Rechengitter	57
4.1.4	Einlassquellen	58
4.2	Bewertung des numerischen Modells	59
4.2.1	Gitterunabhängigkeit	59
4.2.2	Turbulenzmodellierung	63
4.3	Simulations-Szenarien	66
4.3.1	Modell-Szenarien	66
4.3.2	Transport-Szenarien	68
4.3.3	Indikatoren	69
4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	70
5	Experimentelle Validierung	73
5.1	Validierungsergebnisse	73
5.1.1	Validierung des Belüftungsfalles B1	73
5.1.2	Validierung des Belüftungsfalles B2	76
5.1.3	Bewertung der Validierungsergebnisse	78
5.2	Spektralanalyse	79
5.3	Fehlerbetrachtungen	80
5.3.1	Fehlerquellen bei LDA-Messungen	80
5.3.2	Fehlerquellen bei Volumenstrommessungen	82
5.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	82
6	Untersuchung relevanter Einflussgrößen	85
6.1	Einfluss der Einlass-Randbedingung	85
6.1.1	Einfluss der Einlassreynoldszahl	85
6.1.2	Einfluss der Einlassturbulenz	88
6.2	Einfluss der Wand-Randbedingung	92
6.3	Einfluss unterschiedlicher Konfigurationen auf den Stofftransport	96
6.3.1	Einfluss des Einlassmassenstroms von Gefahrgut	96
6.3.2	Einfluss des Gefahrguttyps	98
6.3.3	Einfluss der Gefahrgutquelle	101
6.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	102
7	Simulation von Szenarien	105
7.1	Stofftransport bei Verwendung von Modell-Szenarien	105
7.1.1	Szenario MS-1	105
7.1.2	Szenario MS-2	108
7.1.3	Szenario MS-3	110
7.1.4	Szenario MS-4	113
7.1.5	Bewertung der Modell-Szenarien	115
7.2	Stofftransport bei Verwendung von Transport-Szenarien	116
7.2.1	Szenario OS-1	116
7.2.2	Szenario OS-3	119
7.2.3	Bewertung der Transport-Szenarien	121
7.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	121
8	Zusammenfassung	125
8.1	Zusammenfassung und Erkenntnisse	125
8.2	Ausblick	127

Literaturverzeichnis	129
Anhang	138
A.1 Versuchsaufbau	138
A.2 Versuchsdurchführung	147
A.3 Untersuchung relevanter Einflussgrößen	148

Nomenklaturverzeichnis

Abkürzungen

APU	Auxiliary Power Unit
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
DGR	Dangerous Goods Regulations
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
DNS	Direkte Numerische Simulation / Desoxyribonukleinsäure
EASA	European Aviation Safety Agency
ECS	Environmental Control System
FFT	Fast Fourier Transformation
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GGBefG	Gefahrgutbeförderungsgesetz
HD	Hochdruck
HDPE	High Density Polyethylen
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
LBA	Luftfahrt Bundesamt
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LES	Large Eddy Simulation
ND	Niederdruck
OZG	Obere Zündgrenze
PIV	Particle Image Velocimetry
PSD	Power Spectral Density
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RSM	Reynoldsspannungs-Modell
TKE	Turbulente Kinetische Energie
ULD	Unit Load Device
UN	United Nations
UZG	Untere Zündgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Lateinische Formelzeichen

A_B	Behälteroberfläche	m^2
Ar	Archimedeszahl	1
B_{Spalt}	Breite des Spaltes zwischen Containern	mm
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
C	lokale Konzentration	kg/m^3
C_i	Volumetrisch gemittelte Konzentration der Komponente i	kg/m^3
$C_{i,UZG}$	UZG-Konzentration der Komponente i	kg/m^3
C_0	Konzentration an der Stelle 0 (Einlass/Auslass)	kg/m^3
c_p	Spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
C_x	Konzentration an der Stelle x	kg/m^3
D	Diffusionskoeffizient	m^2/s
E_D	Aktivierungsenergie	J/mol
f_i	Volumenkraft	m/s^2
Fq	Flächenquelle	1
H_{RS}	Randschichtdicke	mm
$H_{Unebenheit}$	Höhe der Unebenheit	mm
i	Komponente	1
J	Teilchenstrom	$mol/(m^2s)$
k	Kinetische Energie	J
l	charakteristische Länge/Membranwandstärke	mm
$L1$	Mittlerer Fehler der Geschwindigkeit	m/s
$L2$	Standardabweichung der Geschwindigkeit	m/s
L_{max}	Maximaler Fehler der Geschwindigkeit	m/s
m_i	Masse der Komponente i	kg
M_i	Molare Masse	g/mol
\dot{m}_G	Gefahrgutmassenstrom	kg/s
\dot{m}_L	Luftmassenstrom	kg/s
\dot{m}_{LH}	Leckagemassenstrom n-Hexan	g/s
\dot{m}_{LT}	Leckagemassenstrom Toluol	g/s
\dot{m}_{PH}	Permeationsmassenstrom n-Hexan	g/h
\dot{m}_{Pi}	Permeationsmassenstrom der Komponente i	g/h
\dot{m}_{PT}	Permeationsmassenstrom Toluol	g/h
P	Permeationskoeffizient	(gmm)/(m ² h)
P_i	Permeationskoeffizient der Komponente i	(gmm)/(m ² h)
P_0	Permeationsfaktor	m^2/s
p_{Bi}	Behälterinnendruck	mbar
p_i	Partialdruck der Komponente i	mbar

$p_{i.A}$	Prüfdruck Innendruckprüfung, Methode A	mbar
$p_{i.B}$	Prüfdruck Innendruckprüfung, Methode B	mbar
$p_{i.C}$	Prüfdruck Innendruckprüfung, Methode C	mbar
p_L	Partialdruck der Luft	mbar
p_D	Dampfdruck	mbar
P_q	Punktquelle	1
Pr	Prandtlzahl	1
p_u	Umgebungsdruck	mbar
p_{V50}	Dampfdruck bei 50 °C	kPa
p_{V55}	Dampfdruck bei 55 °C	kPa
R	Allgemeine Gaskonstante	J/(molK)
Re	Reynoldszahl	1
Re_0	Reynoldszahl am Einlass	1
Re_{rm}	Reynoldszahl im Frachtraum	1
r_i	Volumenanteil der Komponente i	l/m ³
$RS-1 \dots RS-5$	Projektionen der Messpositionen M1 ... M5	1
S	Löslichkeit	m ³ /(m ³ bar)
SqM	Spaltquelle Mitte	1
SqH	Spaltquelle Hinten	1
S_Φ	Quellterm der Transportgröße Φ	1
T	Temperatur	K
Tu	Turbulenzgrad	%
u	x-Komponente des Geschwindigkeitsvektors	m/s
u_0	Strömungsgeschwindigkeit am Einlass	m/s
$u_{i.k.R0}$	Mittlere Geschwindigkeit, Gitter R ₀ am Knoten k	m/s
$u_{i.k.Rx}$	Mittlere Geschwindigkeit, Gitter R _x am Knoten k	m/s
u_i	Kartesische Komponenten des Geschwindigkeitsvektors, $i=1, 2, 3, i=x, y, z$	m/s
u_p	Partikel-Geschwindigkeitsvektor	m/s
u_{rm}	Durchströmungsgeschwindigkeit	m/s
\vec{U}	Geschwindigkeitsvektor der Strömung	m/s
v	y-Komponente des Geschwindigkeitsvektors	m/s
V_B	Behältervolumen	m ³
V_f	Freies Volumen	m ³
w	z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors	m/s
$W1, W2, W3$	Wandunebenheiten	mm
x, X	Kartesische x-Koordinate	1
x_i	Komponente des Ortsvektors x mit $i=1, 2, 3$	mm
y, Y	Kartesische y-Koordinate	1
y^+	Dimensionsloser Wandabstand	1

Y_i	Massenanteil der Komponente i	1
z, Z	Kartesische z-Koordinate	1

Griechische Formelzeichen

α	Einlassmassenstromverhältnis	1
Δ	Differenz	1
δ_{ij}	Kroneckerdelta	1
Φ	Allgemeine Transportgröße	1
Γ_Φ	Diffusionskoeffizient der Transportgröße Φ	1
Γ_t	turbulenter Diffusionskoeffizient	1
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_0	Dichte des Fluids am Einlass	kg/m^3
ρ_i	Dichte der Komponente i	kg/m^3
μ_t	Wirbelviskosität	m^2/s
ζ, η, ξ	Schiefwinklige Raumkoordinaten	1

1 Einleitung

Der Luftverkehr weist im Vergleich zu anderen Verkehrsbereichen seit Jahrzehnten ein überdurchschnittliches Wachstum auf [1]. Insbesondere die weiter zunehmende Internationalisierung des Handels und der Weltwirtschaft führen zu steigenden Transportvolumina im Luftverkehr. Das internationale Luftfrachtaufkommen im weltweiten Linienverkehr stieg von 32,8 Mio. Tonnen in 2002 auf 51,4 Mio. Tonnen in 2011, wie in Abbildung 1-1 dargestellt [2]. Diese Tendenz wirkt sich auch auf den Transport von Gefahrgut im Luftverkehr aus, ein Bereich, der ebenfalls an Bedeutung durch wachsende Volumina gewinnt [3].

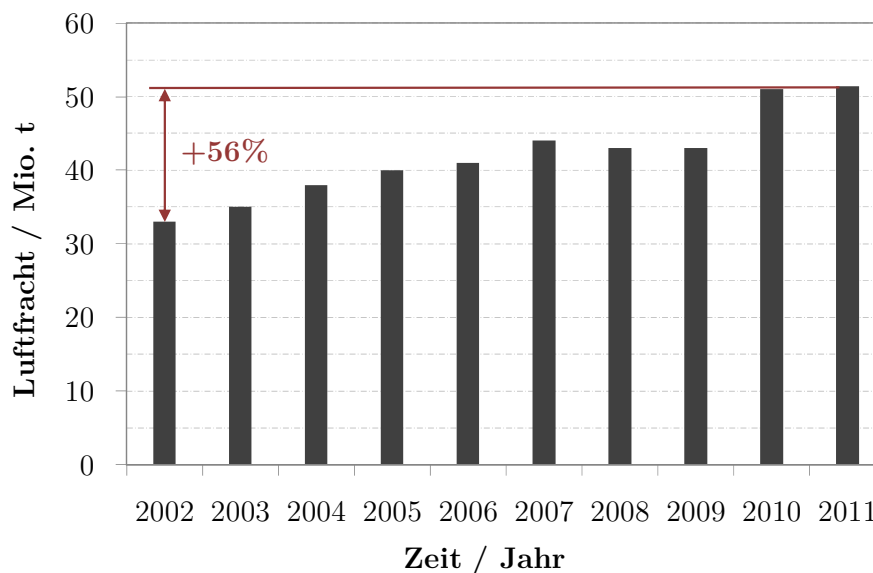


Abbildung 1-1: Entwicklung des weltweiten Luftfrachtaufkommens im Linienverkehr [2]

Gefahrgüter werden sowohl in Fracht- als auch in Passagierflugzeugen befördert und sind gemäß ihrer Klassifizierung in den zulässigen Mengen und nach den geltenden Vorschriften verpackt zu transportieren. Für den Transport von Gefahrgut der Klasse 3 (entzündbare Flüssigkeiten) werden unter anderem Kunststoffverpackungen verwendet. Aus diesen Verpackungen können Flüssigkeiten oder Gase durch Permeation oder Leckage austreten, wenn keine wirksame Permeationsbarriere besteht. Permeation ist ein Diffusionsvorgang, der den molekularen Stofftransport durch eine Membran wie beispielsweise die Wandung einer Kunststoffverpackung beschreibt. Als Leckage wird im Rahmen dieser Arbeit eine Undichtheit des Behälters bezeichnet, wie sie beispielsweise an Dichtringen, Deckeln oder an Schweißnähten und Klebestellen auftreten kann.

Unter ungünstigen Belüftungsbedingungen ist eine Ansammlung entzündlicher oder gesundheitsschädlicher Gase im Frachtraum denkbar. Bei Überschreitung ausreichender Konzentrationen dieser Gase kann es dadurch zu einer Brand- oder Explosionsgefährdung kommen. Treten gesundheitsschädliche Stoffe aus Behältern in die Flugzeugkabine über, werden diese von der Klimaanlage im Flugzeug verteilt und können alle Kabinenbereiche des Flugzeugs erreichen (Passagierkabine, Cockpit, Frachträume), was eine Gefährdung für Passagiere und Crew darstellt [4].

1.1 Motivation

Die Motivation für diese Arbeit ist aus vorangegangenen Untersuchungen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) abgeleitet. In Stichprobenprüfungen der BAM zeigt sich, dass ein beträchtlicher Anteil von Gefahrgutverpackungen aus der Serienfertigung den Anforderungen auf Dichtheit nicht genügt und dadurch den Austritt des Inhalts ermöglicht [5, 6]. Insbesondere Kunststoffverpackungen zeigen eine hohe Fehlerquote bei verschiedenen Prüfverfahren wie der Dichtheitsprüfung oder der hydraulischen Innendruckprüfung [7]. Im Rahmen von weiteren Untersuchungen der BAM werden die Auswirkungen des Austritts von Gefahrgut durch Permeation beim Transport in Seefrachtcontainern untersucht [8, 9]. Die Ergebnisse zeigen, dass unter normalen Transportbedingungen in unbelüfteten Seefrachtcontainern bei Gefahrgutverpackungen ohne wirksamen Permeationsschutz explosive Gemische durch Permeation von Lösungsmitteln entstehen können. Auch die Luftwechselraten belüfteter Container reichen nicht aus, um eine Gefährdung durch explosive Gefahrgutgemische mit ausreichender Sicherheit zu vermeiden. Eine analytische und experimentelle Untersuchung der Auswirkungen der Permeation und Leckage von Gefahrgut im Luftverkehr erweist sich als aufwendig und kostenintensiv [10]. Insbesondere die Bestimmung von Gefahrgutkonzentrationen im Frachtraum ist experimentell eine Herausforderung und wird im Rahmen des Forschungsvorhabens der BAM nicht durchgeführt. Neben der prinzipiellen messtechnischen Problematik, in einem Frachtraum während eines Fluges Konzentrationen zu ermitteln, führt die aufwendige luftfahrtrechtliche Zulassung von Messausrüstung und die begrenzten Standzeiten der Flugzeuge am Boden für die Installation von Versuchsaufbauten im Frachtraum zu sehr hohen Kosten.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag dazu leisten, das Gefahrenpotential beim Transport von Gefahrgut im Luftverkehr zu untersuchen. Hierzu werden Randbedingungen und Szenarien untersucht, die beim Transport von Gefahrgut im Flugzeug auftreten können. Es ist naheliegend, dass eine große Anzahl verschiedener Szenarien existiert, welche beim Lufttransport auftreten. Die vorliegende Arbeit erhebt nicht den Anspruch der Berücksichtigung aller möglichen

Transportbedingungen, sondern soll vielmehr als Beitrag zur Thematik Grundlagen erarbeiten und mittels der Untersuchung ausgewählter Szenarien die gewählte Methodik bestätigen.

Abbildung 1-2 zeigt schematisch zwei mögliche generische Transport-Szenarien. Der linke Teil von Abbildung 1-2 (Szenario A) zeigt eine Beladung mit standardisierten Luftfrachtcontainern, wie sie in Großraum-Flugzeugtypen verwendet werden. Wird ein solcher in sich weitgehend geschlossener Container mit Gefahrgutbehältern beladen, so werden Stoffe, die aus diesen Behältern austreten, sich zunächst im Container ansammeln.

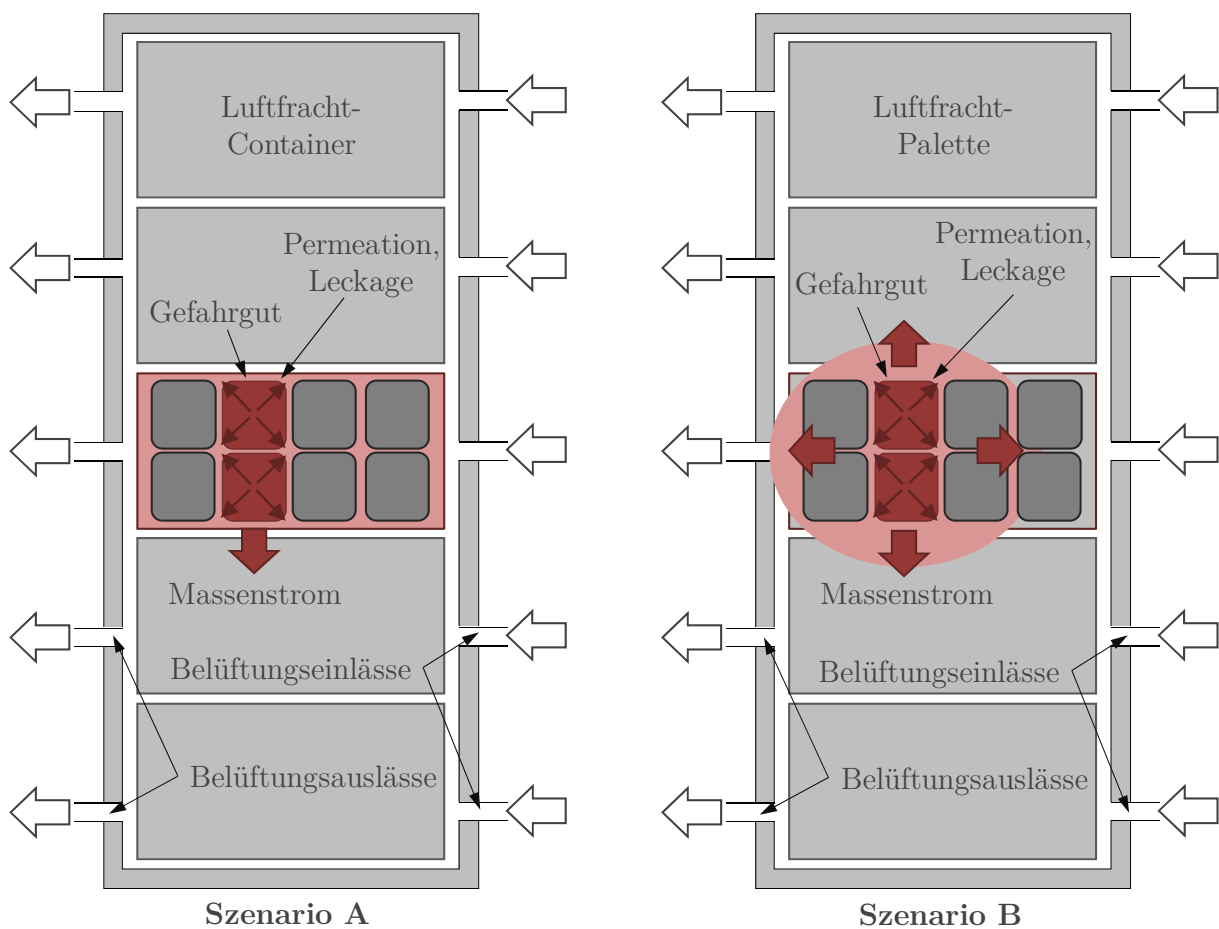


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung möglicher Transport-Szenarien. Links (Szenario A) Beladung mit Luftfracht-Containern, rechts (Szenario B) Beladung mit Luftfracht-Paletten

Eine Untersuchung dieses Szenarios setzt die Kenntnis der Vorgänge im Inneren des Frachtcontainers voraus. Hargather et al. [11] und Smith [12] können zeigen, dass die Aerodynamik und der Stofftransport im Inneren von Luftfrachtcontainern stark vom Typ, der Beladung und dem Zustand des Luftfrachtcontainers abhängen. Gefahrgut

kann insbesondere im Bereich um die Beladungsöffnung des Containers oder an häufig auftretenden Beschädigungen der Außenhaut des Containers austreten.

Die Beladung des Frachtraums mit Luftfrachtpaletten zeigt der rechte Teil der Abbildung 1-2 (Szenario B). Die Fracht (beispielsweise Gefahrgutbehälter) wird auf Frachtpaletten gestapelt und mit einem Gepäcknetz fixiert und in der Regel ohne weitere Abtrennung zum Frachtraum transportiert. Im Flugzeug breiten sich Stoffe, die aus Behältern austreten, daher direkt in den Frachtraum aus.

1.2 Vorgehen und Zielsetzung

Die Ausbreitung von Gefahrgut im Frachtraum aufgrund von Permeation oder Leckage experimentell zu untersuchen ist sehr aufwendig und nur mit begrenzter Aussagekraft möglich. Insbesondere die Tatsache, dass experimentelle Versuche immer nur eine spezifische Situation (Flugzeugtyp, Belüftung, Beladung, etc.) abbilden, schränkt die Allgemeingültigkeit ein. In dieser Arbeit wird aus diesem Grund die Methode der numerischen Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) verwendet, um die skizzierten Vorgänge im Frachtraum zu untersuchen. Die numerische Modellierung physikalischer Vorgänge bietet die Möglichkeit, mit begrenztem Aufwand unterschiedliche Konfigurationen wie beispielsweise die Belüftungssituation, die Frachtraumgeometrie oder die Beladung abzubilden und zu analysieren. Unter Verwendung realistischer Randbedingungen wird gezeigt, welche Parameter den Austritt von Gefahrgut in den Frachtraum beeinflussen und welche Vorgänge eine Ausbreitung und Ansammlung von gefährlichen Stoffen in Flugzeugfrachträumen ermöglichen. Begleitend zur numerischen Strömungssimulation werden Validierungsexperimente an einem Frachtraummodell durchgeführt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung einer numerischen Analyse der Kabinenluftströmungen und der Stofftransportvorgänge in Flugzeugfrachträumen für den Fall des Austritts von Gefahrgut aus Transportverpackungen. Es werden dabei im Wesentlichen drei zentrale Fragestellungen verfolgt:

- Welche Transportbedingungen stellen einen denkbar ungünstigen Fall beim Transport von Gefahrgütern im Luftverkehr dar? Diese Frage wird in Kapitel 2 diskutiert.
- Welche Parameter beeinflussen das Strömungsfeld und den Stofftransport und wie ist dieser Einfluss zu bewerten? Diese Frage wird in Kapitel 5 ausführlich behandelt.
- Wie groß ist unter definierten, realistischen Transportbedingungen das Gefahrenpotential durch den Austritt von entzündlichen Stoffen im Frachtraum einzuschätzen? Diese Frage ist Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 6.

Auf der Grundlage des gewählten Vorgehens ergeben sich folgende Teilziele.

Entwicklung eines numerischen Modells

Im Rahmen der Entwicklung eines numerischen Modells sind sinnvolle Modellvereinfachungen und ein geeignetes Detaillierungsniveau für die durchzuführenden Untersuchungen zu definieren. Für die Untersuchung ist ein generischer Flugzeugfrachtraum zu entwickeln, der die typischen Merkmale von gebräuchlichen Flugzeugmustern abbildet. Die Generierung von numerischen Gittern kann auf Basis einer Frachtraumgeometrie als CAD-Modell erfolgen. Die Randbedingungen, welche für die numerischen Simulationen benötigt werden, sollten auf realitätsnahen Daten basieren. Bei der Entwicklung eines numerischen Modells ist zu untersuchen, welche physikalischen Gegebenheiten die Kabinenluftströmung und den Stofftransport im Frachtraum beeinflussen und aus diesem Grund zu berücksichtigen sind.

Entwicklung eines geeigneten Modellaufbaus zur Validierung des numerischen Modells

Die Validierung des numerischen Modells wird anhand geeigneter Modellversuche an einem Frachtraummodell durchgeführt. Der Maßstab des Modells ist im Hinblick auf eine Kosten-Nutzen-Relation zu definieren. Die Anforderungen an ein geeignetes Frachtraummodell können beispielsweise die optische Zugänglichkeit oder eine realitätsnahe Belüftung des Modells sein. Die Anforderungen sind zu formulieren. Darauf aufbauend richtet sich die Dimensionierung und Auslegung eines Modellaufbaus an den gegebenen Restriktionen wie beispielsweise der zu verwendenden Messtechnik und den räumlichen Verhältnissen aus.

Validierung der numerischen Untersuchungen mittels LDA-Messungen

Numerische Simulation sind mit begleitenden experimentellen Versuchen oder mit bereits vorhandenen Daten zu validieren [13]. Die Planung der experimentellen Validierungsversuche umfasst die Definition des erforderlichen Prüfumfangs, die Ausarbeitung eines Versuchsprogramms und die Durchführung von Versuchsreihen gemäß dem Versuchsprogramm. Die Validierung von mittels CFD berechneter Strömungsgrößen wird anhand von Messdaten durchgeführt. Zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten am Versuchsaufbau wird in dieser Arbeit das Verfahren der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) verwendet. Zur Auswertung von LDA-Messungen und dem Vergleich mit Ergebnissen aus CFD-Simulationen ist eine Aufbereitung der Messdaten und die Darstellung, Analyse und Interpretation der Messergebnisse erforderlich. Eine Fehleranalyse und Abschätzung von auftretenden Messunsicherheiten ist dabei notwendig.

Untersuchung der relevanten Einflussgrößen

Die zu untersuchenden Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Frachtraum werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Dabei üben nicht alle Parameter in gleichem Maße einen Einfluss auf die zu untersuchenden Vorgänge aus. Ziel muss es sein, ein Verständnis zu erarbeiten, welche Parameter das Strömungsfeld und den Stofftransport im Flugzeugfrachtraum beeinflussen und ihr Einfluss ist mittels einer geeigneten systematischen Untersuchung aufzuzeigen.

Numerische Simulation der Strömungs- und Stofftransportvorgänge in Transport-Szenarien

Eine Untersuchung der Stoffausbreitung und der Entstehung von Gefahrgutkonzentrationen im Frachtraum wird anhand von Transport-Szenarien zunächst im Modellmaßstab durchgeführt. Die Identifizierung von lokalen Bereichen im Frachtraum, die aufgrund der Durchströmungssituation und aufgrund lokaler Luftwechselraten eine Ansammlung von Gefahrgütern ermöglichen, ist hierbei die Zielstellung. Anhand der durch Simulationen an Modellszenarien gewonnenen Erkenntnisse wird im Anschluss die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Transport-Szenarien im Originalmaßstab überprüft.

1.3 Stand der Forschung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind keine Forschungsarbeiten veröffentlicht, welche den Transport von Gefahrgut im Flugverkehr vor dem Hintergrund einer möglichen Entstehung und Ausbreitung von Stoffgemischen im Frachtraum der Flugzeugkabine untersuchen. Der im Folgenden dargestellte Stand der Forschung stellt die für diese Arbeit relevanten Themen Flugunfälle aufgrund einer möglichen Beteiligung von Gefahrgut, Untersuchung der Kabinenluftströmungen im Flugzeug und experimentelle Validierung von CFD-Simulationen mittels Modellversuchen dar.

Flugunfälle mit Brandursache

In der Vergangenheit kam es immer wieder zu Flugunfällen und Vorfällen, bei denen Brände möglicherweise den Auslöser darstellten. In einigen dieser Fälle wurde Gefahrgut als Auslöser identifiziert oder muss als Ursache in Betracht gezogen werden. Beispielhaft hierfür werden im Folgenden vier Vorfälle genannt.

Ein Brand auf dem Flug 1406 einer Douglas DC-10 der Firma FedEx im September 1996 führte zu einer Notlandung, nachdem die Crew eine Rauchentwicklung im Frachtraum festgestellt hatte. Als möglicher Auslöser wurde ein DNS-Synthesizer mit brennbaren, flüchtigen Gasen (Tetrahydrofuran und Acetonitril), identifiziert [14]. Auf dem Flug UPS 6 einer Boeing 747-44AF der Firma United Parcel Services im

September 2010 führte ein Brand an Bord zum Absturz der Maschine nahe Dubai. Der Auslöser des Brandes ist noch nicht abschließend geklärt, könnte aber durch eine größere Menge Gefahrgut ausgelöst worden sein [15]. Aufgrund eines Feuers im Frachtraum einer Boeing 747 der South African Air auf dem Flug 295 stürzte die Maschine im November 1987 bei Mauritius ins Meer. Der Auslöser des Feuers konnte nicht zweifelsfrei identifiziert werden [16]. Die Untersuchung der Ursache eines Unfalls einer Lufthansa Cargo Frachtmaschine des Flugs LH 8460 vom Typ MD-11F im Juli 2011 dauert derzeit noch an. Das Flugzeug hatte größere Mengen Gefahrgut als Fracht an Bord [17].

CFD-Simulationen von Innenraumströmungen

Kabinenluftströmungen wurden in der Vergangenheit meist für den Bereich der Passagierkabine untersucht, oft mit der Zielstellung, den Passagierkomfort zu verbessern. Für die Untersuchungen von Innenraumluftströmungen wie sie in Flugzeugkabinen auftreten, hat sich CFD als Methode der Wahl durchgesetzt. Etwa 70 % aller Untersuchungen in diesem Bereich werden inzwischen mittels CFD durchgeführt, wie Chen et al. in einer Literaturstudie zeigt [18, 19]. Chen gibt eine Übersicht über verwendete Methoden und vorhandene Modelle für die Vorhersage und Simulation von Raumluftrömungen. Zahlreiche Autoren verwenden CFD-Simulationen für die Untersuchung eines breiten Spektrums von Aspekten der Kabinenluftströmungen in Flugzeugen.

Baker et al. führt CFD-Simulationen des durch das Klimatisierungssystem generierten, dreidimensionalen Strömungsfeldes in der Passagierkabine eines Großraumflugzeuges durch [20]. Gupta et al. untersucht mit CFD den instationären Stofftransport kleiner Tröpfchen, die durch die Atmung von Passagieren in die Flugzeugkabine gelangen [21]. Yan et al. verwendet CFD-Simulationen, um den globalen Stofftransport verunreinigter Kabinenluft in der Flugzeugkabine zu untersuchen [22]. Yin et al. verwendet CFD um ein neuartiges Belüftungssystem für Großraumflugzeuge auszulegen und dessen Leistungsfähigkeit zu untersuchen [23]. Den Einfluss verschiedener Lufteinlässe auf die globale Kabinenluftströmung untersucht Bianco an einer Rumpf-Sektion eines Business-Jets [24]. Zhang et al. simuliert mittels CFD unterschiedliche Luftführungssysteme in der Passagierkabine einer Boeing 767 vor dem Hintergrund potentieller Gefahren durch die Verteilung von Krankheitserregern [25, 26]. Untersucht wurden Mischströmungs-Belüftungssysteme, Unterboden-Belüftungssysteme und personalisierte Belüftungssysteme auf ihre Wirksamkeit, die Verbreitung von Erregern zu verhindern.

Für Untersuchungen dieser Art mit CFD ist eine geeignete Wahl der Turbulenzmodellierung unter Verwendung von Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Simulationen (RANS) von großer Bedeutung. Eine sehr umfassende Studie zum Thema der Eignung verschiedener Turbulenzmodelle für CFD-Simulationen in belüfteten

Innenräumen stellen Zhai und Zhang et al. vor [27, 28]. Besonders für den Fall von Innenraumströmungen, die typischerweise geringe Strömungsgeschwindigkeiten von unter 1 m/s und kleine Reynoldszahlen aufweisen und damit sehr unterschiedliche Strömungszustände von laminar bis turbulent darstellen, ist eine geeignete Turbulenzmodellierung entscheidend. Bosbach et al. zeigt, dass für isotherme Kabinenluftströmungen insbesondere Low-Reynolds-Number-k- ϵ -Modelle [29] geeignet sind [30]. Günther et al. der eine experimentelle und numerische Untersuchung der turbulenten Strömungen in einer Passagierkabine durchführt, bestätigt dies [31]. Wang zeigt, dass isotherme Strömungen mit allen RANS-Modellen im Vergleich zu gemessenen Werten für die Strömungsgeschwindigkeit und für die turbulente kinetische Energie (TKE) relativ gut wiedergegeben werden [32]. Er führt im Rahmen seiner Dissertation eine umfassende Analyse zur Eignung von RANS-Turbulenzmodellen, Large Eddy Simulationen (LES) und direkten numerischen Simulationen (DNS) für drei verschiedene Strömungsvarianten eines Freistrahls in einen Innenraum durch. Für Strömungen gemischter Konvektion erzielen Zhai et al. und Zhang et al. gute Ergebnisse mit dem RNG-k- ϵ -Modell [33, 27, 28].

Validierung von CFD-Simulationen

Modellversuche bieten eine bewährte Möglichkeit der Untersuchung komplexer Luftströmungen (beispielsweise in Innenräumen) mit wiederholbaren Versuchs- und Randbedingungen (Strömungsbedingungen, Temperaturbedingungen etc.) mit vergleichsweise geringen Kosten. Die Einhaltung der relevanten strömungsmechanischen Ähnlichkeitskennzahlen ist eine bekannte Problematik bei Modellversuchen. Alle Kennzahlen bei skalierten Modellen mit komplexen Strömungsvorgängen einzuhalten, ist meist nicht möglich. Chen et al. führen zu diesem Thema eine Literaturstudie durch und stellen fest, dass aus dem genannten Grund skalierte Modellversuche insbesondere für die Validierung von analytischen, numerischen oder empirischen Modellen verwendet werden und hierfür gut geeignet sind [18, 34, 35].

Oft werden Modelle für die Validierung sowohl experimentell als auch numerisch zunächst maßstäblich verkleinert und erst nach der Validierung wieder auf Originalgröße skaliert, um die relevanten Fragestellungen zu untersuchen. Pfister verwendet für die Validierung von numerischen Untersuchungen von Brandverläufen in Industrieanlagen ein skaliertes Modell im Maßstab 1/200 [36, 37]. Poussou et al. verwendet ein skaliertes Modell einer Flugzeugkabine im Modellmaßstab zur Validierung von numerischen CFD-Simulationen, mittels derer die Ausbreitungsvorgänge von Erregern in der Passagierkabine von Verkehrsflugzeugen untersucht werden [38]. Thatcher et al. und Finlayson et al. verwenden einen skalierten Modellaufbau für die Validierung von CFD-Simulationen von Konzentrationsausbreitungen in großen Innenräumen [39, 40].

2 Transport gefährlicher Güter im Luftverkehr

2.1 Gefahrguttransport

Gefahrgut wird regelmäßig und in beträchtlichen Mengen sowohl auf Passagier- als auch auf reinen Frachtflügen befördert. Für die Beförderung gelten Vorschriften, die weltweit Gültigkeit haben und die in nationalen Gesetzen geregelt sind. Die Vorschriften beim Gefahrguttransport in der Luft regeln die Klassifizierung, die Verpackung, die Kennzeichnung, die Dokumentation und das Handling der gefährlichen Güter.

2.1.1 Vorschriften

Der Transport von Gefahrgut wird weltweit durch die ICAO¹ Technical Instructions (ICAO TI) geregelt [41]. Diese technischen Richtlinien werden in den IATA² Dangerous Goods Regulations (IATA DGR) als praktischer Handlungsleitfaden übernommen [42]. Die Vorschriften gelten für alle Fluglinien, die Mitglied der IATA sind und regeln die Bedingungen für Gefahrgutverpackungen, für Kennzeichnung, Handling, Dokumentation, Arten und zulässige Mengen der Gefahrgüter etc. Für den Luftverkehr in Deutschland werden die Vorschriften durch das Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG) in einem nationalen Gesetz umgesetzt [43]. In den geltenden Vorschriften werden die Prüfanforderungen festgelegt, die die Tauglichkeit von Verpackungen nachweisbar machen. Für das Austreten von Gefahrgut aus der Verpackung durch Permeation und Leckage legen die ICAO TI die Anforderungen aber nur unspezifisch fest. Die Verpackungsspezifikationen (Abschnitt 6.2.6.2) definieren für Kunststoffverpackungen, dass „...ein Durchdringen der Füllung keine Gefahr während den normalen Bedingungen des Transports hervorrufen darf“ [41]. Ein konkreter Grenzwert für Permeation und Leckage wird nicht definiert.

¹ ICAO (International Civil Aviation Organization) ist die internationale Zivilluftfahrtorganisation. Sie hat den Status einer Sonderorganisation der Vereinten Nationen.

² IATA (International Air Transport Association) ist der internationale Dachverband der Fluggesellschaften. Der IATA gehören ca. 230 Fluggesellschaften an, die insgesamt ca. 94 % aller Flüge weltweit durchführen.

2.1.2 Gefährliche Güter

Für die folgenden Betrachtungen sind die Begriffe Gefahrstoff oder gefährlicher Stoff und Gefahrgut oder gefährliches Gut zu definieren. Gefahrstoffe sind chemische Substanzen oder Gemische, von denen eine Gefährdung beim Umgang ausgeht. Eine detaillierte Auflistung und Beschreibung von Gefahrstoffen wird in der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) gegeben [44]. Die Verordnung legt unter anderem die Kennzeichnung, den Umgang und notwendige Schutzmaßnahmen fest. Als Gefahrgut oder gefährliches Gut werden Gefahrstoffe und auch ansonsten ungefährliche Stoffe, Gemische oder Gegenstände bezeichnet, von denen beim Transport aufgrund der Transportsituation eine Gefährdung ausgehen kann. Die gesetzliche Grundlage hierfür wird in Deutschland mit dem Gefahrgutbeförderungsgesetz geschaffen, welches die Beförderung von gefährlichen Gütern auf Straßen, zu Wasser, auf der Schiene und im Luftverkehr regelt. Dort werden als Gefahrgut Gegenstände oder Substanzen bezeichnet, von denen auf Grund ihrer Natur, ihrer Eigenschaften oder ihres Zustandes im Zusammenhang mit der Beförderung Gefahren für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere für die Allgemeinheit, für wichtige Gemeingüter, für Leben und Gesundheit von Menschen sowie für Tiere und Sachen ausgehen können [43]. Gefahrgüter werden gemäß der Art der Gefahr, die von ihnen ausgeht, in eine von neun Gefahrgutklassen eingestuft und gekennzeichnet. Die Einteilung wird in den UN Model Regulations festgelegt und detailliert beschrieben [42]. Eine Übersicht gibt Tabelle 2-1. Den größten Anteil an transportierten Gefahrgütern stellen im Luftfrachtverkehr die Klassen 3 und 9 [3]. Mit Passagiermaschinen werden ca. ein Drittel dieser Gefahrgüter transportiert.

Tabelle 2-1: Übersicht der Gefahrgutklassen gemäß UN-Regulations

Klasse	Unterklasse	Bezeichnung
1		Explosive Stoffe
2	2.1	Entzündbare Gase
	2.2	Nicht entzündbare, nicht giftige Gase
	2.3	Giftige Gase
3		Entzündbare Flüssigkeiten
4	4.1	Entzündbare Feststoffe
	4.2	Selbstentzündliche Stoffe
	4.3	Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündliche Gase bilden
5	5.1	Oxidierende Substanzen
	5.2	Organische Peroxide
6	6.1	Toxische Stoffe
	6.2	Infektiöse Stoffe
7		Radioaktive Stoffe
8		Ätzende Stoffe
9		Verschiedene gefährliche Güter

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird insbesondere das Gefahrenpotential von Gefahrgütern der Klasse 3 beim Transport im Luftverkehr untersucht, siehe auch Abschnitt 2.5.

2.1.3 Verpackungen

Gefahrgut darf im Luftverkehr nur in Verpackungen transportiert werden, die für den Transport im Luftverkehr gemäß der relevanten Richtlinie zugelassen sind [41]. Eine UN-Zulassung für die Herstellung und die Kennzeichnung ist nicht ausreichend. Für den Transport von Gefahrgut der Klasse 3 werden oft Verpackungen aus Kunststoff verwendet, z.B. Kanister oder Fässer aus Kunststoffen wie Polyethylen mit hoher Dichte (HDPE). Für die Zulassung von Verpackungen für den Lufttransport werden in [42] die zu erfüllenden Prüfanforderungen formuliert. Die Leckagesicherheit der Verpackungen wird mittels einer Innendruckprüfung überprüft. Für die Innendruckprüfung ist eine pneumatische oder hydraulische Prüfung mittels Überdruck von innen oder mittels eines Unterdrucks von außen zulässig. Die Ermittlung des Prüfdrucks kann mittels mehrerer Verfahren erfolgen, siehe Tabelle 2-2.

Tabelle 2-2: Prüfmethoden für Gefahrgutverpackungen im Luftverkehr

Methode	Gleichung
Methode A	$p_{iA}=(p_{V55} - 100 \text{ kPa}) * 1,5$
Methode B	$p_{iB}=(p_{V50} * 1,75) - 100 \text{ kPa}$
Methode C	$p_{iC}=(p_{V55} * 1,5) - 100 \text{ kPa}$

Hierbei ist $p_{iA,B,C}$ der Prüfdruck für die Innendruckprüfung nach verschiedenen Methoden, p_{V50} der Dampfdruck bei 50 °C und p_{V55} der Dampfdruck bei 55 °C.

Für die Praxis ist es insbesondere relevant, ob die eingesetzten Verpackungen die Vorschriften tatsächlich erfüllen. Die BAM, als in Deutschland für die Zulassung von Gefahrgutverpackungen zuständige Behörde, führt diesen Nachweis im Rahmen von Stichprobenprüfungen durch. Hierzu werden Verpackungen in den Prüflabors der BAM geprüft. Eine in der Vergangenheit durchgeführte Stichprobenprüfung zeigt, dass ein beträchtlicher Anteil von Verpackungen aus der Serienfertigung den Anforderungen nicht genügt [5, 6]. Im Rahmen der Prüfung werden insgesamt 83 verschiedene Gefahrgutverpackungen von 45 verschiedenen Herstellern geprüft. Insbesondere Kunststoffverpackungen zeigen dabei eine hohe Fehlerquote. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit in der vorliegenden Arbeit neben der Thematik der Permeation durch Kunststoffmembranen auch den Aspekt der Leckage aus Kunststoffverpackungen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Stichprobenprüfung sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

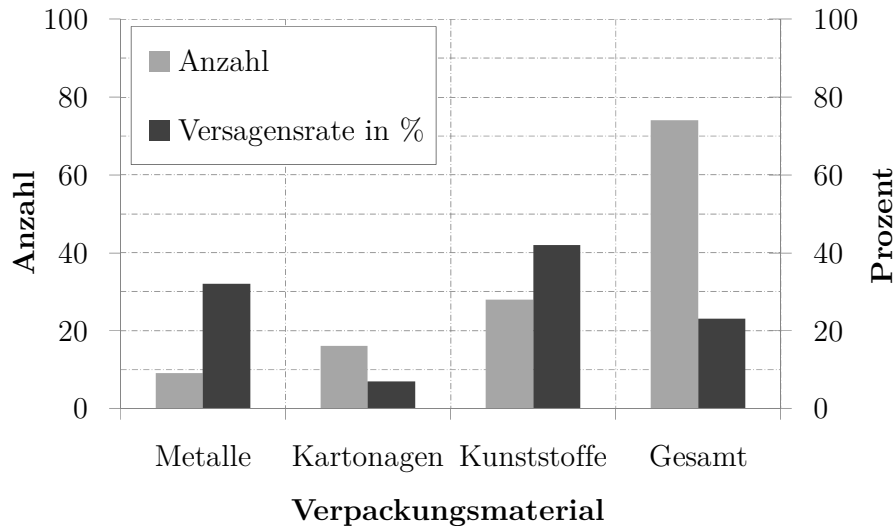


Abbildung 2-1: Ergebnisse der Stichprobenprüfung verschiedener Gefahrgutverpackungen durch die BAM [5, 6]

Die für die Untersuchungen in dieser Arbeit betrachteten Kunststoff-Verpackungen orientieren sich an den nach der geltenden Vorschrift [41] und [42] zulässigen Verpackungen für die betrachteten Stoffe Toluol und n-Hexan. Da die Stoffkennwerte der genannten Stoffe bereits an der BAM ermittelt wurden [9, 45], werden diese in der vorliegenden Arbeit verwendet. Die für diese Stoffe maximal zulässigen Verpackungseinheiten nach [42] sind in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: Zulässige Transportmengen im Luftverkehr für die betrachteten Lösungsmittel [42]

Gefahrgut	Passagierflugzeuge und Frachtflugzeuge	Frachtflugzeuge
Toluol	5 l	60 l
n-Hexan	5 l	60 l

In der Praxis ist eine Vielzahl verschiedener Gefahrgutbehälter in dieser Größe in unterschiedlicher Ausprägung (runder Querschnitt, quaderförmiger Querschnitt etc.) verfügbar. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird stets ein quaderförmiger Standard-Gefahrgutbehälter aus Kunststoff betrachtet. Dieser wird als eine generische, geometrisch vereinfachte Variante von handelsüblichen Gefahrgutbehältern dieser Größe definiert. So werden beim Standard-Behälter beispielsweise Details wie Eckenradien oder Tragegriffe vernachlässigt. Die Eigenschaften und geometrischen Abmessungen dieses Standard-Behälters sind in Tabelle 2-4 aufgeführt. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird ein Füllgrad von 90 % und daraus abgeleitet ein frei bleibendes Volumen im Behälter von 6 l angenommen.

Tabelle 2-4: Eigenschaften und Abmessungen des verwendeten generischen Standard-Behälters

Merkmale	Werte
Behälterwerkstoff	HDPE Lupolen
Behältervolumen V_B	60 l
Freies Volumen V_f (Füllgrad 90 %)	6 l
Behälteroberfläche A_B	1,2 m ²
Wandstärke l (Mittelwert)	2 mm
Höhe x Breite x Länge	640 mm x 340 mm x 390 mm

2.2 Klimatisierung der Flugzeugkabine

Die Klimatisierung und Belüftung der Kabine im Flugzeug übernimmt das Environmental Control System (ECS). Eine gute Einführung in den Aufbau und die Funktion des ECS in Flugzeugen gibt Hunt, Dechow, Bezold und das Committee on Airliner Cabin Air Quality des National Research Council [46, 47, 48]. Hauptaufgabe des ECS ist es, Passagiere, Crew und Fracht mit Luft zu versorgen, verbrauchte Luft zu entsorgen und den Druck in der Flugzeugkabine aufrecht zu erhalten.

2.2.1 Kabinenaufbau

Prinzipiell sind zwei Typen von Flugzeugen zu unterscheiden: Reine Frachtflugzeuge, die über Frachträume im Oberdeck (Maindeck) und im Unterdeck (Lower Deck) verfügen, und Passagierflugzeuge, die auf dem Maindeck Platz für Passagiere bieten und im Lower Deck mehrere Frachträume für Fracht und das Passagiergepäck aufweisen. Prinzipiell unterscheiden sich diese beiden Flugzeugtypen damit in erster Linie in der Ausprägung des Maindecks. Abbildung 2-2 zeigt die Anordnung der unteren Frachträume in einem typischen Flugzeugmuster³.

Aufgrund der Aufnahme der Tragflächen in einem in der Rumpfmittle angeordneten Bereich (Flügelkasten) sind die unteren Frachträume in einen vorderen und hinteren Bereich sowie einen Frachtraum für lose Gepäckstücke („Bulk“) unterteilt. Der vordere und hintere Frachtraum ist auf die Maße von standardisierten Luftfrachtcontainern und -paletten ausgelegt. Eine aktive Belüftung der unteren Frachträume ist nicht in jedem Flugzeug vorhanden, da dies eine Sonderausstattung darstellt, die von Flugzeugbetreibern nicht immer bestellt wird.

³ Darstellung eines Airbus A321, Abbildung der Airbus Deutschland GmbH. Die Anordnung der Frachträume und Dimensionierung des Rumpfqerschnitts ist typisch für moderne Passagier-Flugzeuge. Die Variationen im prinzipiellen Aufbau der Frachträume sind aufgrund der Verwendung von genormten Luftfracht-Containern bei verschiedenen Flugzeugmustern gering.

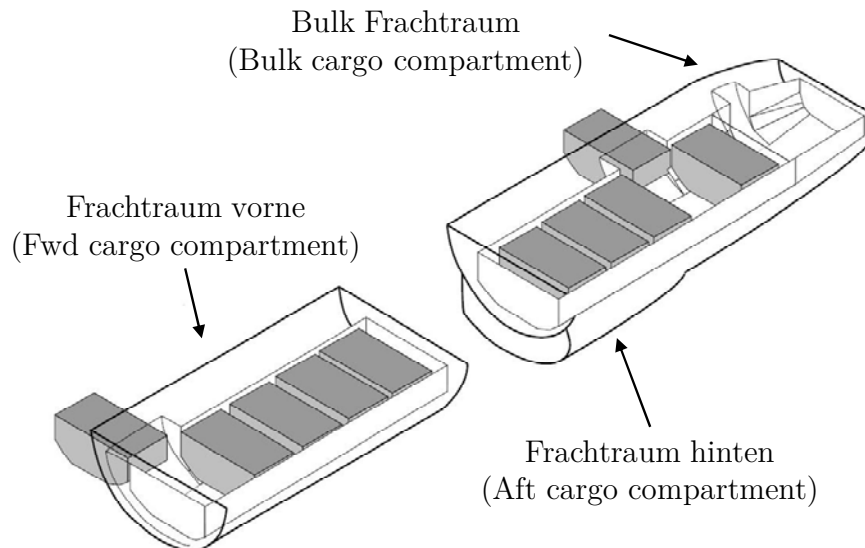


Abbildung 2-2: Ansicht der Frachträume im Lower Deck eines Airbus A321

In Kurzstreckenflugzeugen wird eine Belüftung nicht grundsätzlich verbaut, da dies einen Aufpreis zum Kaufpreis des Flugzeuges und Zusatzkosten im Flugbetrieb durch erhöhten Kraftstoffverbrauch darstellt. Langstreckenflugzeuge werden indes meist mit der Option einer aktiven Belüftung ausgeliefert, um temperatursensible Fracht (beispielsweise verderbliche Güter wie Obst oder Blumen) auch über lange Strecken transportieren zu können. Im Fall von Airbus-Frachtflugzeugen für den Einsatz auf Langstrecken sind mehr als 80 % der derzeit in Betrieb befindlichen Maschinen mit einer aktiven Belüftungseinrichtung der Frachträume ausgerüstet⁴.

Abbildung 2-3 zeigt typische Abmessungen des Rumpfuerschnitts und der unteren Frachträume eines Großraumflugzeuges.

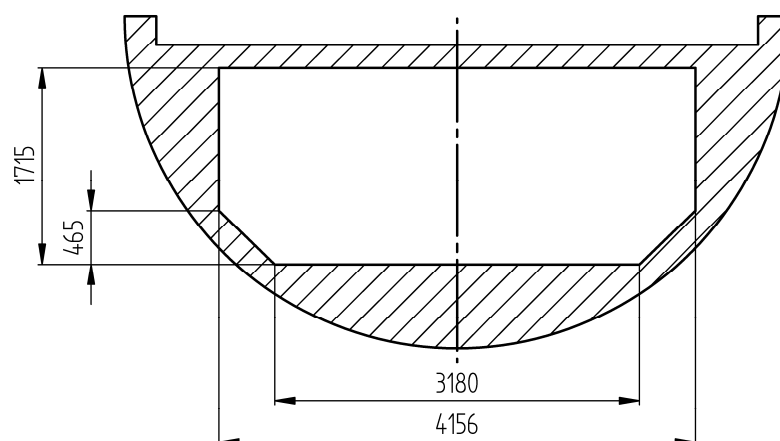


Abbildung 2-3: Typische Abmessungen des Rumpfuerschnitts eines Großraumflugzeuges (Angaben in mm)

⁴ Angaben von Airbus / EADS Deutschland GmbH

2.2.2 Belüftung

Die Luft zur Versorgung der Flugzeugkabine wird den Triebwerken aus dem Kompressionsteil als Zapfluft („Bleed Air“) entnommen [49]. Dies stellt einen Wirkungsgradverlust für das Triebwerk dar und hat somit einen Kraftstoffmehrverbrauch zur Folge. Zur Minimierung des Kraftstoffmehrverbrauchs wird die Klimatisierung der Kabine auf das notwendige Mindestmaß reduziert. Die thermische Behaglichkeit⁵ und Frischluftversorgung von Passagieren und Crew sowie die Notwendigkeit eines geeigneten Kabinendrucks geben hierbei die Grenzen vor. Aus Sicht der Flugzeugbetreiber ist eine ausreichende Belüftung der Frachträume von untergeordneter Bedeutung. Eine schematische Darstellung des ECS in modernen Verkehrsflugzeugen ist in Abbildung 2-4 ersichtlich.

Die Zapfluft weist bei der Entnahme aus den Triebwerken eine Temperatur von ca. 600 °C auf, bevor sie dem ECS zugeleitet wird. Dort wird die Luft auf ca. 200 °C gekühlt und entfeuchtet.

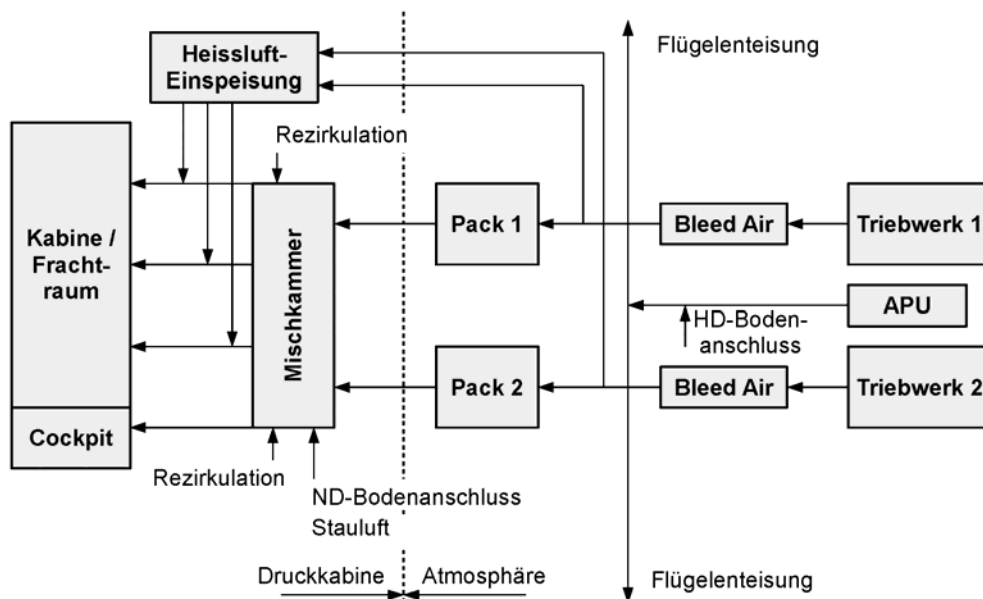


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des ECS eines modernen Verkehrsflugzeugs

Die Belüftung der Frachträume erfolgt über Lufterlässe in der Frachtraumseitenwand⁶, wie in Abbildung 2-5 dargestellt. Die Luftauslässe befinden sich an der

⁵ Als thermische Behaglichkeit wird von Rietschel jener Zustand definiert, bei dem der Mensch mit seiner thermischen Umgebung zufrieden ist, sich thermisch neutral fühlt und weder eine wärmere, noch eine kältere Umgebung wünscht [104].

⁶ Diese Konfiguration ist für moderne Flugzeugmuster des Herstellers Airbus / EADS typisch. Belüftungskonfigurationen anderer Hersteller oder älterer Baumauster können hiervon abweichen.

gegenüberliegenden Seitenwand, sodass sich eine horizontale Durchströmung der Frachträume ergibt. Die Abluft wird aus den Frachträumen in die Bilge (Bereich unter den Frachträumen) geleitet und gelangt von dort über das Auslassventil nach außen. Die Temperatur im Frachtraum kann abgesenkt oder angehoben werden. Zum Kühlen wird kalte Luft aus einem Pack des ECS zu der einströmenden Kabinenluft dazu gemischt. Zum Heizen wird heiße Luft aus dem Heißluftbereich der Zapfluft der Kabinenluft beigemischt. Generell sind die Frachtraumwände thermisch nicht zu den dahinter liegenden Bereichen (Bilge, Dreiecksbereich und Passagierdeck) isoliert, sodass ein Wärme- bzw. Kälteaustausch über die Frachtraumwand stattfindet. Die Bilge stellt den einzigen Bereich im Flugzeug dar, der nicht isoliert ist. Damit wird bezweckt, dass Wasser aus der Kabinenluft in diesem Bereich kondensiert, sodass es von dort bei Bodenaufhalten entfernt werden kann. Obwohl die Aussenluft auf Reiseflughöhe einen relativ geringen Wasseranteil aufweist, stellt Feuchtigkeit in der Kabinenluft ein großes Problem dar, da der Wasseranteil der Luft an den kalten Kabinenwänden kondensiert und so die Masse des Flugzeugs erhöht [50]. Aus diesem Grund wird der Feuchtigkeitsanteil der zugeführten Außenluft soweit reduziert, wie dies möglich ist, ohne die Behaglichkeit der Passagiere zu stark zu beeinträchtigen.

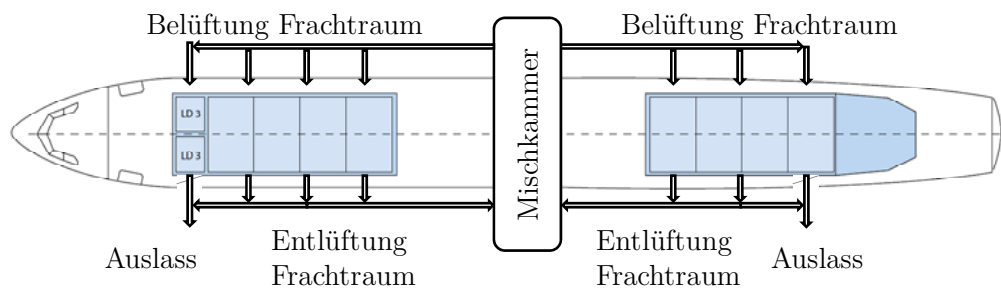


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung der Belüftung der unteren Frachträume

In der Umgebungsluft in Reiseflughöhe liegt Ozon in Konzentrationen vor (ca. 1 ppm), die für den menschlichen Organismus giftig sind und unter anderem Kopfschmerzen, Hustenreiz, Müdigkeit und Augenirritationen auslösen können. Die Ozonkonzentration in der Flugzeugkabine muss daher unter definierten Grenzwerten liegen [51]. Aus diesem Grund ist das ECS mit einem Ozon-Konverter ausgerüstet, der die Ozonkonzentration in der Kabine unter die maximal zulässigen Werte reduziert. Dies wird durch einen Katalysator erreicht, der Ozonmoleküle (O_3) in Sauerstoffmoleküle (O_2) aufspaltet.

Für den Betrieb des ECS am Boden ist eine kleine Gasturbine im Heck des Flugzeugs vorhanden, sodass das ECS auch bei abgeschalteten Triebwerken funktionsfähig bleibt. Diese sogenannte Auxiliary Power Unit (APU) versorgt sowohl das ECS mit Druckluft als auch alle elektrischen Verbraucher an Bord mit elektrischer Energie. Von den Packs wird die Luft in die Mischkammer geleitet, wo Außenluft mit Luft aus der Kabine (Rezirkulation) zu etwa gleichen Teilen gemischt wird. Dadurch wird der

Außenluftbedarf und somit der Wirkungsgradverlust der Triebwerke reduziert. Von der Mischkammer wird die Versorgungsluft in das Maindeck geführt. Die Luft für das Cargo-Deck wird aus dem Maindeck über den Dreiecksbereich (Bereich zwischen Frachtraumwand und Kabinenwand) in die Frachträume geleitet.

Der Druck in der Flugzeugkabine wird über ein bzw. mehrere Auslassventile geregelt. Dies sind elektrisch betätigte Klappen in der Flugzeughülle, über deren Öffnungswinkel der austretende Luftmassenstrom und damit der Kabinendruck geregelt werden. Aufgrund der Änderungen des Kabinendrucks entsteht ein für Flugzeug und Kabine unterschiedliches Druckprofil während eines Fluges, wie in Abbildung 2-6 dargestellt. Der Druck der Kabine ist dabei geringer als der Außendruck, sodass sich in der Kabine während des Fluges ein Druck einstellt, der in etwa dem Druck in einer Höhe von 2500 m entspricht.

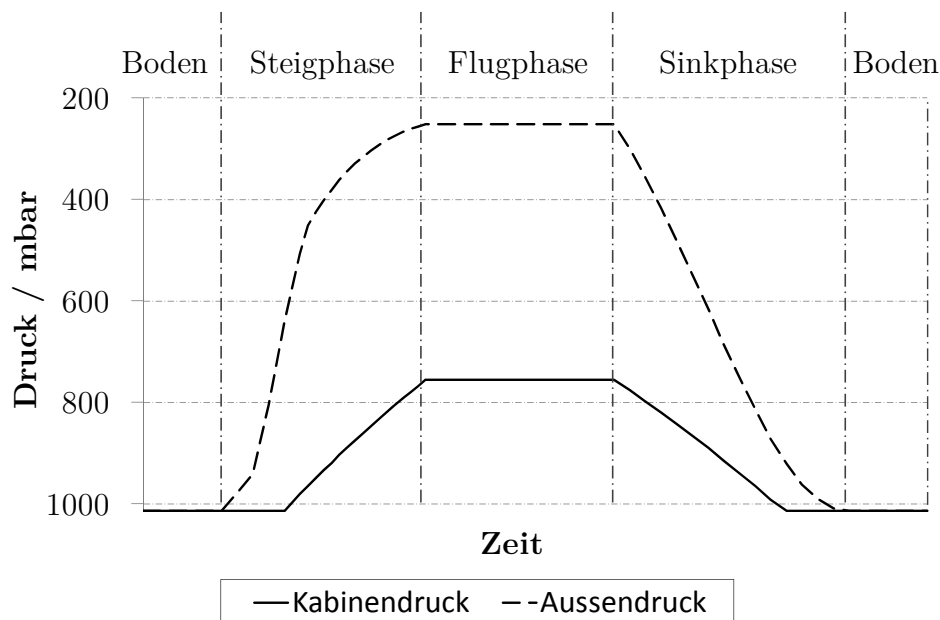


Abbildung 2-6: Druckverlauf innerhalb und außerhalb der Flugzeugkabine

Während der Reiseflugphase befindet sich das Flugzeug auf ca. 10.000 m bis 12.000 m über der Höhe des Meeresspiegels (NN). Der Sauerstoffgehalt in der Luft bleibt auch bei fallendem Luftdruck bei ca. 21 % konstant. Mit zunehmender Höhe sinkt die Dichte der Luft und damit auch die Anzahl der Sauerstoffmoleküle. Dies bewirkt einen sinkenden Sauerstoffpartialdruck im Blut von Flugpassagieren. Der Kabineninnendruck muss daher bei mindestens 758 mbar liegen, um einen Sauerstoffpartialdruck zu erreichen, der einer Druckhöhe von 2438 m entspricht. Der Temperaturbereich in der Passagierkabine sollte zwischen 18 ... 27 °C liegen. Diese Daten werden in der relevanten VDI Richtlinie 6032 [52] vorgegeben und basieren auf den Airworthiness Directives CS-25 der EASA [51].

Einen Kabineninnendruck im Flugzeug aufrecht zu erhalten, der dem Normaldruck am Boden entspricht, ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht darstellbar. Die Druckdifferenz zur Umgebung würde größer und die Flugzeugstruktur müsste für deutlich höhere Druckfestigkeiten ausgelegt werden, was das Fluggewicht erhöhen würde. Aus diesem Grund stellt der Druck in der Kabine, der durch den Luftmassenstrom aus dem ECS erzeugt wird, einen Kompromiss dar. Mit dem Auslassventil wird ein Auslass-Luftmassenstrom nach außen zur Druckregulierung der Kabine eingestellt. Der Kabineninnendruck ist weitgehend ausgeglichen in allen Bereichen. Im Frachtraum besteht ein sehr geringer Unterdruck gegenüber dem Main-Deck von ca. 1 mbar, der durch Leckageströme an Frachtraumtürdichtungen entsteht.

2.3 Permeation

Als Permeation wird der molekulare Stofftransport durch eine Membran bezeichnet. Eine solche Membran stellt beispielsweise die Wandung einer Gefahrgutverpackung dar. Die Moleküle des Stoffes (flüssig oder gasförmig), welche die Membran durchdringen, werden als Permeanten bezeichnet. Das Lösungs-Diffusions-Modell beschreibt die physikalischen Vorgänge der Permeation und gliedert sich in drei Schritte [53]. Diese werden am Beispiel der Permeation eines Lösungsmittels durch die Membran eines Kunststoffbehälters verdeutlicht:

1. Adsorption: Moleküle des Lösungsmittels lagern sich an der Kunststoffmembran auf der Innenseite des Behälters an und dringen ein.
2. Diffusion: Lösungsmittelmoleküle wandern innerhalb des Kunststoffs entlang eines Konzentrationsgradienten durch die Membran hindurch.
3. Desorption: Die Moleküle treten aus der Membran aus und werden an die Umgebung abgegeben.

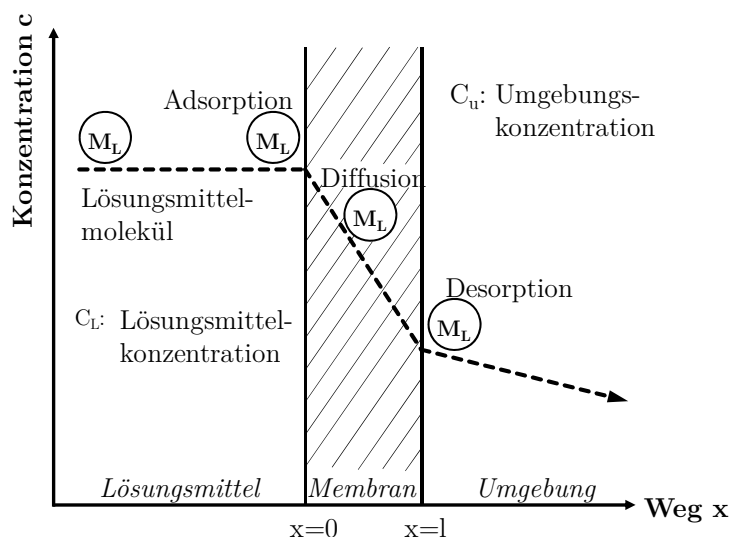


Abbildung 2-7: Lösungs-Diffusions-Modell der Permeation [53]

2.3.1 Permeation aus Kunststoff-Verpackungen

Die Diffusionsvorgänge im Kunststoff beruhen auf dem Bestreben des Permeenten, einen Konzentrationsausgleich zu erreichen, da innerhalb des Kunststoffs ein Konzentrationsgradient des Stoffes vorliegt. Eine mathematische Formulierung der Diffusionsvorgänge stellen die beiden Fickschen⁷ Gesetze dar [54, 55]. Das erste Ficksche Gesetz beschreibt den Stoffdurchgang als Teilchenstrom J im stationären Fall durch eine Membran. Mittels der Fickschen Gesetze wird die Diffusion durch Polymere für den Fall geringer Quellneigung beschrieben [56]:

$$J = -D \left(\frac{dC}{dx} \right) = -D \frac{C_0 - C_x}{l} \quad (2-1)$$

Hierbei ist D der Diffusionskoeffizient und C_0 und C_x die Stoffmengenkonzentration an den Stellen $x=0$ und $x=l$ und l die Membranwandstärke. Das zweite Ficksche Gesetz ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung der Strömungsmechanik [57] und Gleichung (2-1) und beschreibt den instationären Stoffdurchgang für den dreidimensionalen Fall:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2-2)$$

Mit dem Diffusionskoeffizienten D und der Löslichkeit S berechnet sich der Permeationskoeffizient P zu [58]:

$$P = D \cdot S \quad (2-3)$$

Da der Permeationskoeffizient die Menge an Gas beschreibt, die durch die Membran austritt, kann dieser in Einheiten von Masse, Mol oder Volumen angegeben werden. In der Praxis ist meist die Permeationsrate oder Durchlässigkeitsrate von Interesse, die beispielsweise in der Einheit $\text{gmm}/\text{m}^2\text{h}$ angegeben wird.

2.3.2 Ermittlung von Permeationsraten

Die analytische Berechnung der Permeation aus Gefahrgutbehältern setzt die Kenntnis der Permeationskennwerte für die zu untersuchenden Membranwerkstoffe und Permeenten voraus. Permeationskennwerte für Gefahrgut sind meist nicht aus Datenbanken verfügbar. Aus diesem Grund müssen die notwendigen Stoffkennwerte ermittelt werden. Kennwerte zur Permeation werden für verschiedene Permeenten und

⁷ Adolph Fick (1829–1901) formulierte 1855 die Gesetze zur Beschreibung der Diffusion.

verschiedene Membranwerkstoffe an der BAM von Goedecke et al. in einer umfassenden Laboruntersuchung ermittelt [9, 45]. Für die Studie werden drei verschiedene Arten von Lupolen in drei verschiedenen Wandstärken als Membranwerkstoff verwendet. Auf Basis von europaweit transportierten Mengen und Ihrer Relevanz werden drei Lösungsmittel ausgewählt. Es sind im Folgenden die Ergebnisse für die Stoffe Toluol und n-Hexan dargestellt.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Permeation durch Behälterwerkstoffe sind der an der Permeation beteiligte Stoff (Molekülgröße, Molekülkettenlänge, etc.), die Prozesstemperatur, die Membran (Werkstoff und Wandstärke) und die Zeit, in der die Permeation abläuft [59, 60]. Die Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen [9, 45] zeigen den Einfluss dieser Faktoren deutlich.

Temperaturabhängigkeit

Diffusionsvorgänge sind wärmeaktive Prozesse. Mittels des Arrheniusansatzes können diese mathematisch beschrieben werden:

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{E_D}{RT}} \quad (2-4)$$

Hierbei ist P_0 der Permeationsfaktor, E_D die Aktivierungsenergie der Diffusion, R die allgemeine Gaskonstante und T die Temperatur. Mit steigender Temperatur steigen auch die Molekülbewegungen des Permeanten. Da die Aktivierungsenergie definitionsgemäß positiv ist, steigen der Diffusionskoeffizient und damit auch die Permeation mit der Temperatur an. Die Abhängigkeit des Permeationskoeffizienten P von der Temperatur ist aus Abbildung 2-8 ersichtlich.

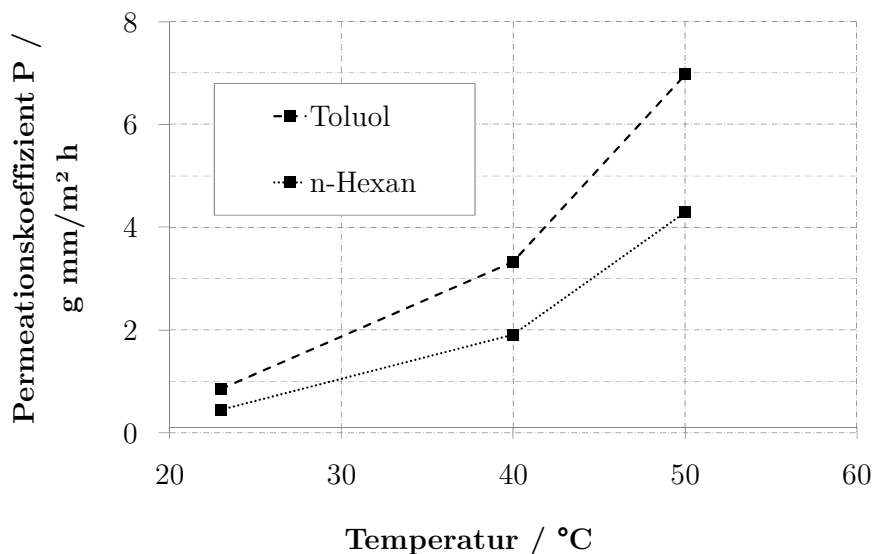


Abbildung 2-8: Temperaturabhängigkeit des Permeationskoeffizienten

Membran

Den Einfluss der Membran auf die Permeation bestimmen insbesondere die Kristallinität und die Dichte des Polymers [61]. Kristalline Bereiche des Kunststoffes besitzen eine höhere Dichte und weisen daher eine geringere Permeation auf. Permeation findet besonders in amorphen Bereichen von Polymeren statt. Dichtere Kunststoffe mit einer hohen Kristallinität weisen aus diesem Grund geringere Permeationsraten auf. Der Einfluss der Wanddicke auf die Permeation ist aus Gleichung (2-1) und aus Abbildung 2-9 ersichtlich. Mit zunehmender Wandstärke sind sinkende Permeationskoeffizienten zu verzeichnen.

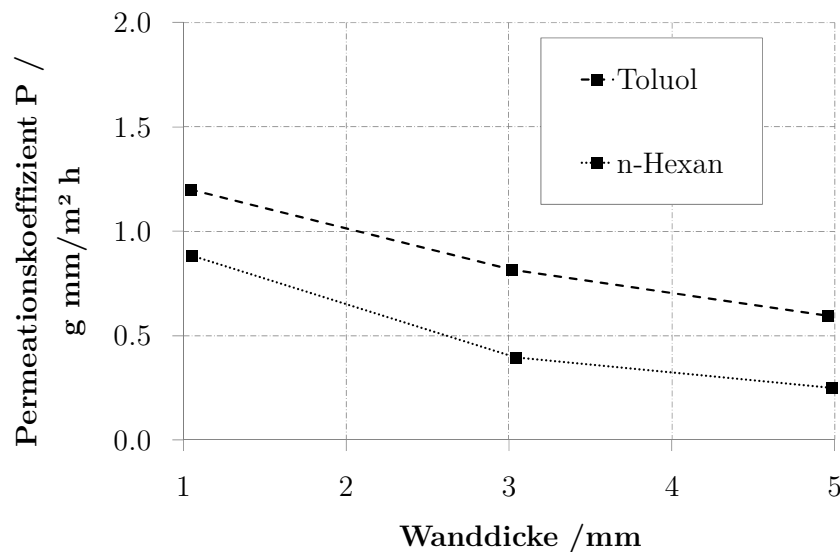


Abbildung 2-9: Einfluss der Wandstärke auf den Permeationskoeffizienten

Für die Praxis von Bedeutung ist auch das Herstellungsverfahren der Membran, welches ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Permeation hat. Da die Behälter beim Extrusionsblasen deutlich schneller abgekühlt werden als bei der Plattenherstellung für Probekörper nach Norm [62], entstehen weniger kristalline Bereiche im Kunststoff [63]. Die Permeation findet vor allem in amorphen Bereichen statt, sodass diese Verpackungen höhere Permeationsraten aufweisen.

Druck

Für den Anwendungsfall der Permeation an Gefahrgutverpackungen im Lufttransport ist die Druckabhängigkeit des Permeationskoeffizienten von Interesse. Bei der Permeation von Gasen durch eine Membran gilt für ideale Gase eine Unabhängigkeit des Permeationskoeffizienten vom Partialdruck des Gases. Auch für viele reale Gase ist diese Annahme richtig, falls der Permeant und die Kunststoffmembran keine Wechselwirkungen zeigen [60]. Die Permeationsraten von Toluol bei Normaldruck von 1013 mbar und einem typischen Kabinendruck von ca. 700 mbar sind in Abbildung 2-10 dargestellt.

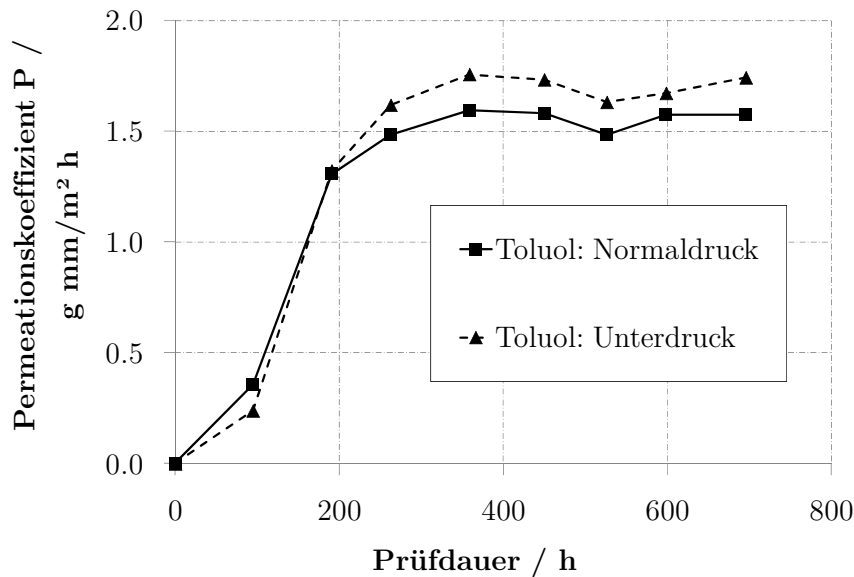


Abbildung 2-10: Einfluss verschiedener Drücke auf den Permeationskoeffizienten

Es wird ersichtlich, dass der Einfluss des Drucks auf die Permeationsrate für diesen Bereich relativ gering ist. Für die weiteren Betrachtungen wird dieser Effekt vernachlässigt.

Permeent

Permeenten mit längeren Molekülketten weisen höhere Permeationsraten auf als Stoffe mit kürzeren Molekülketten. Die räumliche Struktur hat ebenfalls einen Einfluss. Fayoux zeigt in [64], dass mehrfachverzweigte Verbindungen in größerer Menge in Polymere eindringen bzw. durch diese diffundieren. Bei Gasen sind vor allem der Siedepunkt und das Molekulgewicht wesentliche Einflussfaktoren auf die Permeation [65].

2.4 Leckage

2.4.1 Leckage aus Kunststoff-Verpackungen

Gefahrgut kann im Lufttransport neben den beschriebenen Diffusionseffekten der Permeation auch durch Leckagen austreten. Während des Fluges entstehen Druckminderungen in der Flugzeugkabine, sodass das absolute Druckniveau auf ca. 700 mbar absinkt. Gefahrgutverpackungen müssen zwar gemäß den Anforderungen einer relativen Druckdifferenz von 750 mbar standhalten (siehe Abschnitt 2.1.3), eine Prüfung der Behälter unter Druckminderungen findet aber nur über eine Dauer von 5 Minuten statt [42]. Tatsächlich kommt es im Flugverkehr zu Druckveränderungen über längere Zeiträume, da nach dem Erreichen der Reiseflughöhe ein abgesenktes Druckniveau über mehrere Stunden herrscht.

In der Praxis kommt es immer wieder vor, dass sich Verpackungen beim Lufttransport in Folge der Druckveränderungen zusammenziehen, sodass sich ihr Volumen vermindert [5]. Es entsteht im Behälter nach dem Start in der Steigphase zunächst ein Überdruck, da der Kabinendruck sinkt (siehe Abbildung 2-6). Dieser Überdruck im Behälterinneren kann sich beispielsweise durch Behälterleckagen an den Kabinendruck angleichen. Im Sinkflug fällt der Kabinendruck, sodass der Behälter einem scheinbaren Überdruck ausgesetzt und zusammengedrückt wird. Es muss davon ausgegangen werden, dass aus dem Behälter bei Auftreten von Druckgradienten zwischen Behälterinnerem und Kabine ein Gemisch aus Luft und Gefahrgut austreten kann.

In einem von der BAM in Zusammenarbeit mit dem Luftfahrt Bundesamt (LBA) veröffentlichten Leitfaden zur Beurteilung mangelbehafteter Versandstücke im Luftverkehr werden derartige Verpackungen beschrieben, die beim Lufttransport verformt werden [5]. Die Veröffentlichung eines Leitfadens zur Bewertung verformter Verpackungen verdeutlicht die Relevanz für den operativen Lufttransport.

2.4.2 Ermittlung von Leckageraten

Die rechnerische und experimentelle Ermittlung von Leckageraten wird auf Basis der Methodik der Vakuumtechnik durchgeführt. Eine Einführung und Übersicht hierzu gibt Umrath [66]. Leckagen treten bei Kunststoffverpackungen besonders in lösbaren Verbindungen wie Dichtringen und Deckeln und in nicht lösbaren Verbindungen wie Schweißnähten und Klebefugen auf. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Fall F1: Das Lösungsmittel im Behälter geht aus der Flüssigphase in die Gasphase über und bildet ein Gemisch aus Lösungsmittel und der Luft, die im freien Volumen des Behälters vorhanden ist. Dieses Luft-Gefahrgut-Gemisch tritt durch Leckage aus dem Behälter aus.
- Fall F2: Das Lösungsmittel im Behälter geht aus der Flüssigphase in die Gasphase über. Das freie Volumen des Behälters wird als evakuiert angenommen, sodass das freie Volumen mit reinem Lösungsmittel ausgefüllt wird. Das gasförmige Lösungsmittel tritt durch Leckage aus dem Behälter aus.

Einen Sonderfall stellt die Leckage aus der Flüssigphase des Gefahrguts dar. Dieser Fall wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Die hierfür relevanten komplexen Vorgänge des Austritts von Flüssigkeit durch Leckagen sind derzeit Gegenstand der Forschung an der BAM. Eine mögliche Gefahrgutausbreitung aus Lachen und deren Verdunstung ist Gegenstand der Untersuchung von Habib [67].

Im Fall F1 ist für die Bestimmung der Masse des austretenden Gases der Volumenanteil des Lösungsmittels r_i über die Partialdrücke der beiden Komponenten Lösungsmittel und Luft zu ermitteln [68]:

$$r_i = \frac{p_i}{p_i + p_L} \quad (2-5)$$

Hierbei ist p_i der Partialdruck des Lösungsmittels i und p_L der Partialdruck von Luft. Mittels des Volumenanteils r_i , der idealen Gaskonstante R , der Gastemperatur T , der molaren Masse M_i , des betrachteten Volumens V_f , der Austrittszeit Δt und des Druckabfalls zwischen Behälterinnendruck und Umgebungsdruck Δp lässt sich der gesuchte Massenstrom m_i für die Komponenten i bestimmen [66]:

$$\dot{m}_i = \frac{r_i V_f M_i}{RT} \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (2-6)$$

Für den zweiten Fall F2 kann die Masse des austretenden Lösungsmittels direkt über die Leckagerate als Massenstrom \dot{m}_i berechnet werden, hierbei ist V_f das freie Volumen im Behälter [66]:

$$\dot{m}_i = \frac{V_f M_i}{RT} \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (2-7)$$

2.5 Gemischbildung

Die Umgebungsbedingungen der Kabine und die verwendeten Verpackungen stellen die Randbedingungen für Permeation und Leckage von Stoffen aus Gefahrgutverpackungen dar. Beim Austreten von brennbaren Stoffen aus Verpackungen kann es zur Bildung von Gemischen aus Gefahrgut und Luft und daraus resultierend zur Ausbildung einer brennfähigen oder explosionsfähigen Atmosphäre kommen.

2.5.1 Explosionsgefährdung

Eine Explosion oder Verbrennung kann gemäß der technischen Regel BGR 104 [69] auftreten, wenn folgende vier Faktoren gegeben sind:

1. Ein ausreichend großer Dispersionsgrad der brennbaren Stoffe,
2. Eine Konzentration der brennbaren Stoffe innerhalb der Zündgrenzen,
3. Eine explosionsfähige Atmosphäre,
4. Eine Zündquelle.

Der Dispersionsgrad von Nebeln und Aerosolen liegt mit Teilchengrößen von ca. $10^{-1} \dots 10^{-3}$ mm in einer Größenordnung, die für eine Explosion ausreicht. Das Vorhandensein einer Zündquelle wird stets vorausgesetzt, wenn dies nicht sicher

auszuschließen ist [69]. Für die Beurteilung einer Explosionsgefahr bleibt daher die Konzentration einer explosionsfähigen Atmosphäre zu quantifizieren.

2.5.2 Zündgrenzen

Als Zündung wird die instationäre chemische Reaktion der beteiligten Stoffe bezeichnet, die zu einer Ausbildung von Flammen und einer Verbrennung der Stoffe führt [70]. Voraussetzung hierfür ist ein zündfähiges Gemisch aus brennbaren Gasen, Dämpfen oder Stäuben. Bei Erreichen einer definierten Konzentration sind diese Gemische zündfähig. Die untere Zündgrenze (UZG) und die obere Zündgrenze (OZG) beschreiben den Bereich zündfähiger Gemische aus Brennstoff und Oxidator. Außerhalb dieses Konzentrationsbereiches tritt eine Zündung nicht oder nur kurzfristig auf, da eine Flammenausbreitung nur im stöchiometrischen Bereich erfolgt. Eine Untersuchung der Temperatur- und Druckabhängigkeit der Zündgrenzen führt Pawel et al. durch und zeigt, dass in den für diese Arbeit relevanten Umgebungsdruckbereichen von ca. 700...1000 mbar⁸ die UZG keine signifikanten Abweichungen von den Werten aus der Literatur aufweisen [71]. Diese sind für die betrachteten Lösungsmittel in Tabelle 2-5 dargestellt und [72] zu entnehmen.

Tabelle 2-5: Zündgrenzen für betrachtete Lösungsmittel

Gefahrgut	UZG /		OZG /	
	g/m ³	Vol %	g/m ³	Vol %
Toluol	42	1,1	300	7,8
n-Hexan	35	1,0	319	8,9

2.5.3 Analytische Bestimmung von Massenströmen

Im Folgenden werden die Massenströme von austretendem Gefahrgut quantifiziert und die zugrundeliegenden Annahmen beschrieben. Diese Werte dienen als Eingangsgrößen für die Untersuchungen des Stofftransports in Frachtraum mittels CFD-Simulationen. Das Verhalten von Gemischen aus Gasen oder Dämpfen ist maßgeblich von deren Dichte im Vergleich zu Luft abhängig. Mit wenigen Ausnahmen ist die Dichte von Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten größer als die Dichte von Luft. Die Dichte des Gemisches wird vom Sättigungsdruck der Flüssigkeit beeinflusst. Der Diffusionskoeffizient beeinflusst die Ausbildung von explosionsfähigen Atmosphären nur, falls keine Luftströmungen vorhanden sind [69].

⁸ Wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt variiert der Kabinendruck in Anhängigkeit der Flughöhe in diesem Bereich aufgrund einer erwünschten Druckabsenkung innerhalb der Flugzeugkabine.

Tabelle 2-6: Allgemeine Daten für die Berechnung der Gefahrgut-Massenströme

Größe	Wert	Einheit
Umgebungsdruck p_u	770	mbar
Behälterinnendruck p_{Bi}	1000	mbar
Druckdifferenz Δp	230	mbar
Gaskonstante R	83,14	mbarl/molK
Temperatur T	293	K
Zeitintervall Δt	60	Min

Tabelle 2-7: Physikalische Eigenschaften der betrachteten Gefahrgüter [72]

Größe	Toluol	n-Hexan	Einheit
Summenformel	C ₇ H ₈	C ₆ H ₁₄	
Molare Masse M_i	92,14	86,18	g/mol
Dichte ρ	0,87	0,66	kg/m ³
Spezifische Dichte (Dampf-Luft-Gemisch) (-)	1,06	1,32	-
Dampfdruck p_D (293 K)	29,1	162,0	mbar
Permeationskoeffizient P (293 K)	1,7	5,8	gmm/m ² h

Für die folgenden Berechnungen werden die in Tabelle 2-6 dargestellten Daten verwendet. Für die Berechnungen werden 64 Standardbehälter zugrundegelegt (siehe Abschnitt 2.1.3). Für die verwendeten Permeationskoeffizienten wird eine Vorlagerungsdauer von 100 h angenommen. Die Stoffdaten sind [72] entnommen. Es werden jeweils die resultierenden Massenströme für die Betrachtungen im Modellmaßstab 1/10 und im Originalmaßstab 1/1 berechnet. Die physikalischen Eigenschaften der Gefahrgüter sind in Tabelle 2-7 dargestellt.

Bestimmung der Permeations-Massenströme

Die Berechnung der Permeations-Massenströme erfolgt auf Grundlage der Richtlinie DP-2 der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) [73]. Die dafür notwendigen Permeationskoeffizienten werden an der BAM ermittelt, siehe Abschnitt 2.3.2 sowie [9, 10]. Der Permeationsmassenstrom ergibt sich durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 [73]:

$$\dot{m}_{P_i} = P_i \frac{A_B}{\rho_i l} (p_{Bi} - p_u) \quad (2-8)$$

Hierbei ist \dot{m}_{P_i} der Permeation-Massenstrom, P_i der Permeationskoeffizient, A_B die Behälteroberfläche, ρ_i die Dichte, l die Wandstärke, p_U der Umgebungsdruck und p_{Bi} der Behälterinnendruck. Die daraus resultierenden Leckage-Massenströme für die Betrachtungen im Maßstab 1/10 und 1/1 für 64 Standard-Behälter sind in Tabelle 2-8 dargestellt. Ein Luftfrachtcontainer des betrachteten Typs LD6/ALF fasst maximal 64 Standard-Behälter (siehe Abschnitt 2.6).

Tabelle 2-8: Permeations-Massenströme der betrachteten Gefahrstoffe

Massenstrom	Maßstab 1/10	Maßstab 1/1
\dot{m}_{PT} (Toluol)	1.45E-06 g/s	1.45E-05 g/s
\dot{m}_{PH} (n-Hexan)	7.26E-07 g/s	7.26E-06 g/s

Bestimmung der Leckage-Massenströme

Im Folgenden werden die beiden Fälle F1 und F2 gemäß Abschnitt 2.4.2 für 64 Standardbehälter in den Maßstäben 1/10 und 1/1 quantifiziert. Für die Berechnung werden die Daten aus Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 in die Gleichungen (2-5) und (2-6) eingesetzt. Die daraus resultierenden Leckage-Massenströme sind in Tabelle 2-9 zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 2-9: Leckage-Massenströme der betrachteten Fahrgüter für die Fälle F1/F2

Fall	Massenstrom	Maßstab 1/10	Maßstab 1/1
F1	\dot{m}_{LT} (Toluol)	8.92E-06 g/s	8.92E-03 g/s
	\dot{m}_{LH} (n-Hexan)	4.65E-05 g/s	4.65E-02 g/s
F2	\dot{m}_{LT} (Toluol)	3.53E-04 g/s	3.53E-01 g/s
	\dot{m}_{LH} (n-Hexan)	3.30E-04 g/s	3.30E-01 g/s

Ergebnisse der Massenstrom-Berechnungen

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass die resultierenden Massenströme im Fall F2 am höchsten sind. Diese liegen ca. eine Größenordnung über den Massenströmen im Fall F1 und ca. zwei Größenordnung über den Permeations-Massenströmen. Für die Simulationen in dieser Arbeit werden die Massenströme des Falls F2 und der Permeation verwendet.

2.6 Transportbedingungen

Um die Stoffausbreitungsvorgänge beim Transport von Fahrgut im Frachtraum zu bewerten, ist zum einen ein Verständnis der relevanten Einflussgrößen zu erarbeiten und zum anderen sind geeignete repräsentative Transport-Szenarien zu untersuchen. Eine detaillierte Diskussion der Transport-Szenarien erfolgt in Kapitel 6, eine Darstellung und Bewertung der relevanten Einflussgrößen erfolgt in Kapitel 5. Relevante Merkmale der Transportbedingungen bilden die Aspekte Umgebungsbedingungen (beispielsweise Belüftung, Temperatur und Druck), Flugdauer und Beladung (beispielsweise Fahrgutart, Fahrgutmenge, Beladungssituation etc.). Diese Aspekte sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

2.6.1 Umgebungsbedingungen

Belüftung

Die Belüftungssituation und damit auch die Strömungssituation im Frachtraum wird maßgeblich durch das ECS als aktives Belüftungssystem beeinflusst. Ist ein aktives Belüftungssystem nicht vorhanden, so ist die Strömungssituation maßgeblich von natürlicher Konvektion beeinflusst. Flugzeuge mit unbelüfteten Frachträumen werden vor allem auf Kurzstrecken verwendet. Für Langstreckenflüge werden in der Regel Flugzeugmuster mit aktiv belüfteten Frachträumen verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird sowohl der Fall eines nicht aktiv belüfteten Frachtraumes als auch der Fall eines aktiv belüfteten Frachtraumes betrachtet.

Temperatur

Die Frachtraumtemperatur lässt sich bei aktiv belüfteten Frachträumen in einem vorwählbaren Temperaturbereich regeln. Die Temperaturen während des Fluges betragen in belüfteten Frachträumen ca. 10 ... 20 °C. Tatsächlich auftretende Temperaturen im Flugzeugfrachtraum werden von Goedecke et al. stichprobenartig ermittelt [10]. Beispielhaft hierfür ist der Temperaturverlauf des Linienfluges EZY 4667 von Berlin nach Lissabon dargestellt, siehe Abbildung 2-11.

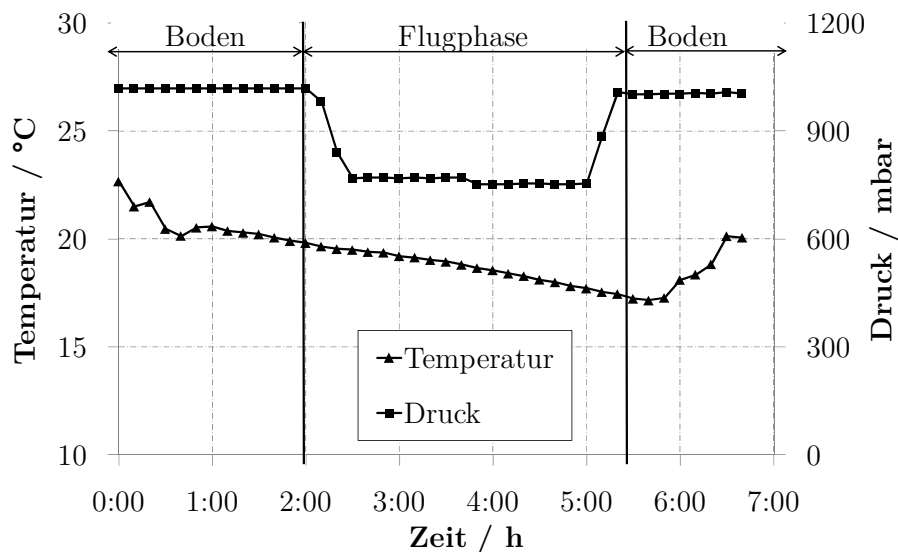


Abbildung 2-11: Druck- und Temperaturverlauf im Flugzeugfrachtraum am Beispiel des Linienfluges EZY 4667 [10]

Vor der Flugphase sinkt die Temperatur des Containers aufgrund der natürlichen Temperaturentwicklung außerhalb des Frachtraumes ab. Während der Flugphase sinkt die Temperatur aufgrund einer geringeren Frachtraumtemperatur weiter ab. Nach der Flugphase nähert sich die Temperatur wieder der Umgebungstemperatur am Boden an.

Insgesamt wird deutlich, dass die Temperatur im Frachtraum im Bereich von ca. 10 ... 20 °C liegt.

Druck

Ausgehend vom Umgebungsdruck am Boden sinkt der Kabinendruck über den Verlauf der Flugphase auf ca. 760 mbar, bevor der Druck am Boden wieder auf den lokalen Umgebungsdruck ansteigt. Der tatsächlich auftretende Druckverlauf im Flugzeugfrachtraum ist in Abbildung 2-11 dargestellt. Es wird deutlich, dass der genannte Richtwert für den Kabinendruck von ca. 760 mbar die Situation in der Realität gut abbildet.

2.6.2 Flugdauer

Permeations- und Leckagevorgänge sind zeitabhängige Vorgänge. Aus diesem Grund ist die Flugdauer eine relevante Größe für Transport-Szenarien. Für Kurzstrecken und Mittelstrecken sind typische Flugzeiten von max. 5 h realistisch. Für Langstrecken sind derzeit maximale Flugzeiten von bis zu 18 h möglich. Diese Werte stellen für die Untersuchungen in dieser Arbeit die Grenzen dar.

2.6.3 Beladung

Container

Die Beladung der Frachträume mit ULD (Containern oder Paletten) verändern das verbleibende freie Volumen des Frachtraums. Damit wird die Kabinenluftströmung im Frachtraum beeinflusst. Die Beladung der Frachträume erfolgt mit standardisierten Frachtcontainern und -paletten, siehe Abbildung 2-3 und [74]. Aufgrund der hohen Transportkosten und einer daraus resultierenden wirtschaftlichen Notwendigkeit zu maximalen Auslastungen im Luftverkehr wird der Frachtraum für alle folgenden Betrachtungen als voll beladen angenommen. Dabei wird keine Unterscheidung zwischen Containerbeladung und Palettenbeladung vorgenommen, da laut Technischer Richtlinie [75] die maximal möglichen Konturen der beladenen Palette denen von Standardluftfrachtcontainern entsprechen. Es werden Standardcontainer des Typs LD6/ALF zugrundegelegt.

Gefahrgutbeladung

Die im Luftverkehr und in dieser Arbeit verwendeten Verpackungen für Gefahrgut werden in Abschnitt 2.1.3 beschrieben. Für die betrachteten Gefahrgüter Toluol und n-Hexan gelten gemäß ICAO TI [41] die Verpackungsvorschriften 307 bzw. 612, die für Toluol und n-Hexan eine Verpackungseinheit von maximal 60 l erlauben.

Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird eine Standard Beladung definiert, welche auf der geometrisch maximal möglichen Anzahl an Standard-Behältern (siehe Tabelle 2-4) je ULD vom Typ ALF basiert. Als Standard-Beladung werden 64 Stück Standard-Behälter definiert, wie in Abbildung 2-12 dargestellt. Hellrot markiert sind die für die Standard-Beladung gewählten Austrittsflächen für Massenströme aus Behältern in den Frachtraum (Flächenquelle, Spaltquelle und Punktquelle). Gefahrgutbehälter sind dunkelrot dargestellt.

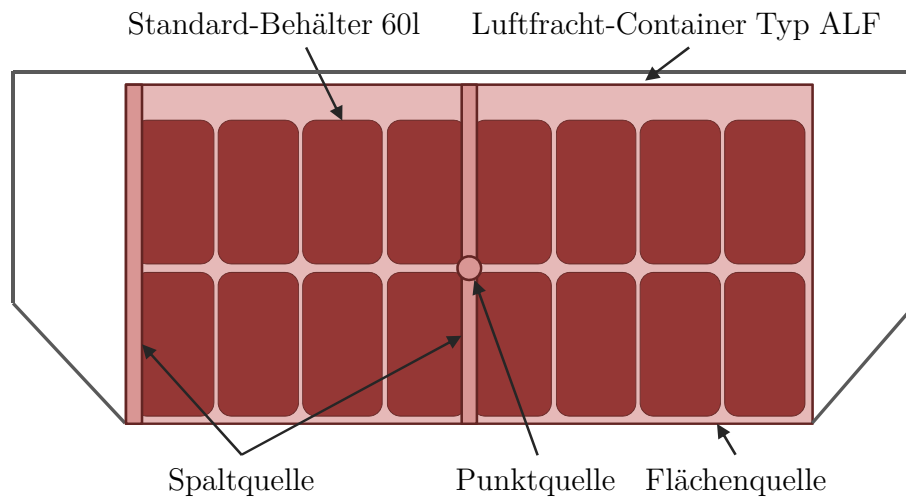


Abbildung 2-12: Verwendete Standard-Beladung mit Luftfracht-Paletten / Luftfracht-Containern und Gefahrgutbehältern sowie Gefahrstoffquellen

2.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Der Transport von Gefahrgut wird weltweit durch die ICAO Technical Instructions (ICAO TI) geregelt. Diese werden in Deutschland durch das GGBefG in ein nationales Gesetz umgesetzt.
- Gefahrgüter sind Stoffe, von denen auf Grund ihrer Eigenschaften bei der Beförderung Gefahren für die öffentliche Sicherheit ausgehen. Diese werden gemäß UN-Regulations in neun Gefahrgutklassen eingeteilt. In dieser Arbeit werden brennbare Flüssigkeiten (Klasse 3) betrachtet, welche gemeinsam mit Stoffen der Klasse 9 den größten Anteil an im Luftverkehr transportierten Gefahrgütern darstellen.
- Es wird ein Standard-Behälter mit 60 l Inhalt und einem Füllgrad von 90 % als Gefahrgutbeladung im Frachtraum definiert.
- Die Belüftung, Klimatisierung und Druckregulierung der Flugzeugkabine inkl. der Frachträume erfolgt durch das ECS. Für Airbus-Flugzeugmuster erfolgt die Belüftung der Frachträume im Lowerdeck über Lufteinlässe und -Auslässe in der

Frachtraumseitenwand, sodass sich eine horizontale Durchströmung der Frachträume ergibt. Typische Frachtraumtemperaturen liegen bei 10 ... 20 °C, der typische Kabinendruck liegt während des Fluges bei ca. 760 mbar.

- Die Permeationsraten unter verschiedenen Einflussparametern werden für relevante Materialien von Gefahrgutbehältern und für Gefahrgüter an der BAM ermittelt.
- Wie Stichproben der BAM zeigen, treten Undichtigkeiten an Gefahrgutbehältern in der Realität auf.
- Aufgrund der vorliegenden Gegebenheiten von Dispersionsgrad und Zündquelle kann eine Brand- oder Explosionsgefährdung im Flugzeug auftreten, wenn eine ausreichend hohe Konzentration von Gefahrgut vorliegt.
- Die analytische Berechnung der Massenströme beim Austritt von Gefahrgut aus Verpackungen zeigt, dass Permeation gegenüber Leckage um ca. zwei Größenordnungen geringere Massenströme erzeugt. In dieser Arbeit werden daher nur Leckagen des Falls F2 verwendet. Es werden dabei 64 Standard-Behälter als Beladung vorausgesetzt, da ein Luftfrachtcontainer des Typs LD6/ALF maximal 64 Standard-Behälter aufnehmen kann.
- Die für Transport-Szenarien relevanten Aspekte sind die Belüftungssituation (aktiv belüftet / nicht aktiv belüftet), die Flugdauer, die Frachtraumtemperatur und der Frachtraumdruck sowie die Beladung (Menge / Gefahrgut).

3 Methoden

Numerische Strömungsberechnungen mittels CFD stellen derzeit das Mittel der Wahl für eine breite Palette von Anwendungen in der Lüftungstechnik dar. CFD wird in einer Vielzahl von Untersuchungen verwendet, die die Aspekte Luftqualität, thermischer Komfort, Brandsicherheit und -schutz, Leistungsfähigkeit von Raumklimaanlagen in allen Arten von Gebäuden (Wohngebäude, Gewerbegebäude, Krankenhäuser, Tunneln, etc.) und Fahrzeugen (Schienenfahrzeuge, LKW, PKW, Flugzeuge, etc.) bewerten. Vor diesem Hintergrund ist auch für die vorliegende Anwendung die Verwendung von CFD naheliegend. Mittels CFD wird ein mathematisches Modell algebraischer Gleichungen erstellt, welches anschließend durch die numerische Integration dieser Gleichungen gelöst wird [18]. Für die Beurteilung der Ergebnisse von CFD-Simulationen ist es Stand der Technik, begleitende experimentelle Versuche zu Validierungszwecken durchzuführen. Als Validierung wird die Beurteilung der Übereinstimmung zwischen numerisch ermittelten Ergebnissen aus CFD-Simulationen und experimentell ermittelten Versuchsergebnissen bezeichnet [76]. Eine ausführliche Erörterung der Thematik gibt Oberkampff und Trucano [13].

Die mathematische Beschreibung der Strömungs- und Stofftransportvorgänge sowie die Methoden zur Validierung der durchgeführten CFD-Simulationen sind Gegenstand dieses Kapitels. Dies beinhaltet die Grundgleichungen numerischer Strömungs- und Stofftransportsimulationen, die Modellierung turbulenter Strömungen, die Beschreibung der Ähnlichkeitsproblematik bei Modellversuchen, den verwendeten Versuchsaufbau, das LDA-Messsystem, sowie die Versuchsdurchführung und die verwendeten Vergleichsgrößen.

3.1 Numerische Strömungsberechnung

3.1.1 Grundgleichungen

Die Beschreibung der Luftströmungen im Frachtraum erfolgt mittels der nach Navier und Stokes⁹ benannten Navier-Stokes-Gleichungen. Diese Grundgleichungen der Strömungsmechanik stellen ein gekoppeltes System partieller, nichtlinearer Differenzialgleichungen zweiter Ordnung dar, welches aus den Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie in Form von Transportgleichungen besteht.

⁹ Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836), ein französischer Mathematiker und Professor für Mechanik, und George Gabriel Stokes (1819-1903), ein britischer Mathematiker und Präsident der Royal Society, veröffentlichten unabhängig voneinander die anschließend als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichneten Grundgleichungen der Strömungsmechanik.

Eine allgemeine differentielle Form der Transportgleichung ergibt sich aus Gleichung (3-1) nach [77]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (3-1)$$

Hierbei sind ϕ eine allgemeine Transportgröße, Γ_ϕ der Diffusionskoeffizient der Transportgröße ϕ und S_ϕ der Quellterm der Transportgröße ϕ . Für den betrachteten Fall einer inkompressiblen, instationären und isothermen Raumluftrömung ergibt sich unter Verwendung der Summenkonvention nach Einstein [77] und der Hypothese von Stokes [78] die Massenerhaltung für $\phi=1$ aus Gleichung (3-1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3-2)$$

Die Impulserhaltung ergibt sich aus Gleichung (3-1) für $\phi = u$ zu:

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_i \quad (3-3)$$

Hierbei stehen x_i für die kartesischen Koordinaten $i=1, 2, 3$ bzw. x, y, z und u_i für die Geschwindigkeitskomponenten u, v, w .

Zur Beschreibung von Strömungen mit mehr als einer Fluidkomponente, beispielsweise für den Stofftransport eines gasförmigen Gefahrguts und seiner Ausbreitung im Flugzeugfrachtraum, ergibt sich der Massenanteil der jeweiligen Komponente aus Gleichung (3-1) für $\phi = Y_i$ zu [79]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (3-4)$$

Y_i ist hierbei der lokale Massenanteil der Komponente i und S_i die Produktionsrate der Komponente i . Der Massenanteil der Komponente i ist definiert als:

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (3-5)$$

Hierbei ist ρ_i die Dichte der Komponente i .

3.1.2 Modellierung turbulenter Strömungen

Für die numerische Simulation turbulenter Strömungen sind verschiedene Methoden verfügbar. Die Direkte Numerische Simulation (DNS), bei der turbulente Strömungen mittels Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen berechnet werden, stellt die exakteste Methode der Simulation dar. Für den Fall von Raumluftrömungen ist der Rechenaufwand für DNS sehr hoch, da in der Regel sehr kurze Zeitschritte und sehr feine Gitter in der Größenordnung von $Re^{9/4}$ notwendig sind [80, 81]. Large Eddy Simulationen (LES), bei der die Annahme zugrunde gelegt wird, dass vor allem große Wirbelstrukturen die charakteristischen Eigenschaften einer turbulenten Strömung ausmachen, weisen ebenfalls eine hohe, wenn auch etwas geringere Präzision bei noch immer hohem Rechenaufwand auf [27].

Aufgrund des geringeren Rechenaufwands haben sich für die numerische Simulation von Raumluftrömungen Reynolds Averaged Navier Stokes Modelle (RANS) durchgesetzt. Diese Modelle verwenden zeitlich gemittelte Werte der relevanten Größen. Für inkompressible Strömungen ist die Reynoldsmittelung von Strömungsgrößen geeignet, welche die relevanten Strömungsgrößen u , v , w , ρ und p in einen Schwankungs- und einen Mittelwert aufteilt [82]:

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i) + \phi'(x_i, t) \quad (3-6)$$

Hierbei ist ϕ die jeweils betrachtete Strömungsvariable. Die Reynoldsmittelung der Erhaltungsgleichungen führt zum sogenannten „Schließungsproblem“, welches durch die Mittelung zusätzlich entstehender Terme erzeugt wird. Die als Reynolds-Spannungen $\overline{\rho u'_i u'_j}$ und als turbulenter Skalarfluss $\overline{\rho u'_i \phi'}$ bezeichneten Zusatzterme führen dazu, dass die Erhaltungsgleichungen mehr Unbekannte als Gleichungen enthalten [77]. Das Schließungsproblem kann mittels verschiedener Ansätze in Form von Turbulenzmodellen gelöst werden. Es werden hier die beiden unterschiedlichen Ansätze der Wirbelviskositätsmodelle und der Reynolds-Spannungsmodelle kurz dargestellt, da dies die relevanten Ansätze der verwendeten Turbulenzmodelle sind.

Wirbelviskositätsmodelle verwenden eine Vereinfachung des Reynolds-Spannungstensors gemäß der Boussinesq-Approximation¹⁰ und modellieren den Einfluss der Turbulenz auf die Strömung über die Viskosität. Bei der Modellierung des Reynolds-Spannungstensors werden die insgesamt sechs voneinander unabhängigen Reynolds-Spannungen durch den

¹⁰ Die nach dem französischen Mathematiker Boussinesq benannte Boussinesq-Approximation verwendet bei gravitationsabhängigen Strömungen mit kleinen Dichteänderungen des Fluids im instationären und im konvektiven Term der Transportgleichungen eine konstante Dichte, was eine beträchtliche mathematische Vereinfachung darstellt [77].

singulären Parameter der Wirbelviskosität berechnet. Dies führt dazu, dass die Turbulenz als isotrop vorausgesetzt werden muss, was die Anwendbarkeit und Genauigkeit dieser Modelle einschränkt [83].

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (3-7)$$

Hier sind μ_t die Wirbelviskosität, δ_{ij} das Kroneckerdelta und k die kinetische Energie der Turbulenz. Der turbulente Skalarfluss berechnet sich wie folgt:

$$-\overline{\rho u'_j \phi'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \quad (3-8)$$

Hierbei ist Γ_t der turbulente Diffusionskoeffizient. Damit wird das Problem auf die Berechnung der unbekanntenen Wirbelviskosität μ_t vereinfacht.

Reynolds-Spannungsmodelle bieten eine weitere, weitaus komplexere Möglichkeit der Lösung des Schließungsproblems. Diese Modelle basieren auf dynamischen Erhaltungsgleichungen für den Reynolds-Spannungstensor, welche aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet werden können [77]. Für Reynolds-Spannungsmodelle muss die Voraussetzung der Isotropie der Turbulenz nicht gelten, da alle Komponenten der Reynolds-Spannungen einzeln mittels Transportgleichungen berechnet werden. Dies führt zu der Entstehung von sieben zusätzlichen Differentialgleichungen, was einen beträchtlich erhöhten Rechenaufwand bedeutet.

Derzeit verfügbare Turbulenzmodelle weisen allgemein bekannte Vor- und Nachteile auf und sind dadurch für verschiedene Anwendungsfälle unterschiedlich gut geeignet. Dies macht es notwendig, die Eignung des zu verwendenden Turbulenzmodells für die jeweilige Anwendung zu überprüfen. Aus der relevanten Literatur ergeben sich Empfehlungen für die Turbulenzmodellierung bei der Simulation von Raumluftströmungen (siehe Abschnitt 1.3). Auf Basis der Erkenntnisse insbesondere der Untersuchungen von Zhai et al. [27] und Zhang et al. [28] werden in dieser Arbeit drei Modelle vorausgewählt, um das für den vorliegenden Fall am besten geeignete Modell zu ermitteln. Die verwendeten Modelle werden alle bereits für die Simulation von Innenraumströmungen verwendet und zeigen in der jeweiligen Anwendung meist gute Ergebnisse im Vergleich zu experimentellen Daten. Einen ausführlichen Überblick hierzu gibt Wang [32].

RNG-k- ϵ -Modell

Das auf dem Standard-k- ϵ -Modell basierende RNG-k- ϵ -Modell wurde von Yakot und Orszag entwickelt [84]. Im Gegensatz zum Standard-k- ϵ Modell nach Launder und

Spalding [85] wird bei diesem Modell eine analytische Gleichung für die turbulente Prandtlzahl und eine analytisch hergeleitete Gleichung für die effektive Viskosität verwendet, um Strömungseffekte bei niedrigen Reynoldszahlen zu berücksichtigen [86].

SST-k- ω -Modell

Das von Menter entwickelte SST-Modell [87, 88] vereint die Vorteile des Standard-k- ω -Modells nach Wilcox [89] im wandnahen Bereich mit den Vorteilen des Standard-k- ε -Modells im wandfernen freien Bereich der Strömung. Das SST Modell basiert auf dem Standard-k- ω -Modell, enthält aber einen zusätzlichen Kreuzdiffusionsterm, der aus der Kombination mit dem Standard-k- ε -Modell resultiert [86]. Dieses Modell hat seit seiner Einführung 1994 starke Verbreitung gefunden.

BSL-Reynolds-Spannungs-Modell

Aufgrund der Lösung des Reynolds-Spannungstensors bieten Reynolds-Spannungs-Modelle (RSM) in der Regel bessere Ergebnisse als Wirbelviskositätsmodelle, insbesondere sind sie dem k- ε -Modell oft überlegen [77]. Das in Ansys CFX[®] verfügbare Reynolds-Stress-Modell BSL verbessert die bekannten Nachteile von RSM-Modellen dahingehend, dass es die ω -Gleichung zur Skalenfestlegung verwendet anstelle der üblichen ε -Gleichung. Das BSL-Modell basiert auf der ω -Gleichung des Baseline k- ω -Modells [79] und bietet eine verbesserte Auflösung im wandnahen Bereich gegenüber dem Wilcox-Modell durch die Verwendung einer Blendingfunktion „F1“.

Die in den Turbulenzmodellen verwendeten Koeffizienten und Konstanten sind Tabelle 3-1 zu entnehmen. Die verwendeten Variablen beziehen sich auf die allgemeine Transportgleichung (siehe Gleichung (3-1)).

Tabelle 3-1: Variablen und Koeffizienten für Turbulenzmodelle nach Zhang [28] und Ansys [79]

Modell	Variablen	Koeffizienten/ Konstanten
RNG- k- ε	ϕ k, ε	$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$
	Γ_ϕ $\mu + \mu_t / \sigma_{k,t}$	$G_k = \mu_t S^2$
	$\mu + \mu_t / \sigma_{\varepsilon,t}$	$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$
	S_ϕ $G_k - \rho\varepsilon + G_B$	$G_B = \beta g_i (\mu_t / \sigma_{T,t}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}$
	$C_{\varepsilon 1} G_k \varepsilon / k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2 / k + E$	$C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92$
		$C_\mu = 0,09$
		$\sigma_{T,t} = 0,9, \sigma_{k,t} = 1,0$
		$\sigma_{\varepsilon,t} = 1,3, \sigma_{C,t} = 1,0$

Modell	Variablen	Koeffizienten/ Konstanten
SST- k- ω	ϕ k, ω Γ_ϕ $\mu + \mu_t / \sigma_k$ $\mu + \mu_t / \sigma_\omega$ S_ϕ $\tilde{G}_k - Y_k$ $G_\omega - Y_\omega + D_\omega$	$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max(1/\alpha^*, SF_2/a_1\omega)}$ $G_k = \mu_t S^2$ $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ $\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega)$ $G_\omega = \frac{\rho\alpha G_k}{\mu_t}$ $Y_k = \rho\beta^*k\omega, Y_\omega = \rho\beta\omega^2$ $D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$ $\alpha^* = \frac{\beta_t/3 + (\text{Re}_t/6)}{1 + (\text{Re}_t/6)}, \text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu\omega}$ $\beta^* = \beta_\infty^* \frac{4/15 + (\text{Re}_t/8)^4}{1 + (\text{Re}_t/8)^4}$ $\alpha_1 = 0,31, \beta_\infty^* = 0,09,$ $\beta_1 = 0,072, \sigma_{\omega,2} = 1,168$
BSL- RSM	ϕ k, ω Γ_ϕ $\mu + \mu_t / \sigma_{k3}$ $\mu + \mu_t / \sigma_{\omega3}$ S_ϕ $P_k - Y_k - P_{kb}$ $D_\omega + G_\omega - Y_\omega + P_{\omega b}$	$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$ $P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho\sigma_\rho} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad G_\omega = \alpha_3 \frac{\omega}{k}$ $P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} [(\alpha + 1)C_3 \max(P_{kb}, 0) - P_{kb}]$ $D_\omega = 2(1-F_1)\rho \frac{1}{\omega\sigma_{\omega 2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$ $G_\omega = \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k$ $Y_k = \rho\beta^*k\omega, Y_\omega = \rho\beta_3\omega^2$ $\alpha_1 = 5/9, \alpha_2 = 0,44, \alpha_3 = F1\alpha_1 + (1-F1)\alpha_2$ $\beta_1 = 0,075, \beta_2 = 0,083, \beta_3 = F1\beta_1 + (1-F1)\beta_2,$ $\beta^* = 0,09$ $\sigma_{\omega 1} = 2, \sigma_{\omega 2} = 1/0,856, \sigma_{k1} = 2, \sigma_{k2} = 1$ $\sigma_{\omega 3} = F1\sigma_{\omega 1} + (1-F1)\sigma_{\omega 2},$ $\sigma_{k3} = F1\sigma_{k1} + (1-F1)\sigma_{k2}$

3.2 Validierung numerischer Simulationen

Die Validierung numerisch erzeugter Simulationsergebnisse kann mit geeigneten Modellversuchen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Versuche im Modellmaßstab durchgeführt, um durch Messung der Strömungsgeschwindigkeiten das Strömungsfeld im Frachtraum experimentell zu bestimmen. Für die Vermessung dreidimensionaler Strömungsfelder von Innenraumströmungen haben sich die beiden laseroptischen Messmethoden Particle Image Velocimetry (PIV) und Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) durchgesetzt. Für experimentelle Untersuchungen im Bereich der Innenraumbelüftung werden zumeist eine der beiden Methoden oder ihrer Varianten verwendet [30, 31, 32, 90]. Eine Untersuchung, die in Ihrer Anwendung von LDA der vorliegenden Arbeit ähnelt, wird von Bender durchgeführt [91]. Bender verwendet das LDA-Verfahren erfolgreich für die Vermessung von Luftströmungen in engen Luftführungskanälen zur Validierung von CFD-Simulationen. Er zeigt, dass das LDA-Verfahren dem PIV Verfahren insbesondere für kleine Strömungsgeschwindigkeiten und für große Geschwindigkeitsgradienten aufgrund des höheren zeitlichen und räumlichen Auflösungsvermögens überlegen sein kann. Die geometrischen Verhältnisse in der vorliegenden Arbeit sind durch enge Kanäle gekennzeichnet, sodass das LDA-Verfahren eine geeignete Methode zur Vermessung des Strömungsfeldes darstellt.

Die Validierung wird mittels einer einkomponentigen Strömung durchgeführt. Eine Validierung von mehrkomponentigen Simulationen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Folgende Punkte verdeutlichen, warum dies nicht zwingend erforderlich ist:

- Die Validierung des in dieser Arbeit verwendeten numerischen Modells mittels auf der Geschwindigkeit basierender Größen zeigt die grundsätzliche Eignung des Modells durch Vergleich von Experiment und Berechnung.
- Die zu untersuchenden Stofftransportvorgänge werden mit demselben numerischen Modell berechnet, sodass eine zuvor durchgeführte Validierung dieses Modells für die Berechnung von Strömungsfeld und Stofftransport gelten kann.
- Die mittels der Berechnung von Stofftransportvorgängen gewonnenen Erkenntnisse werden Indikativ verwendet. Die Präzision absoluter Werte steht dabei weniger im Vordergrund. Vielmehr sollen die in dieser Arbeit erarbeiteten Erkenntnisse die Grundlage für weitere Untersuchungen spezifischer Anwendungsfälle bilden.

3.2.1 Modellversuche

Die Durchführung von Validierungsexperimenten im Originalmaßstab ist mit großem Aufwand verbunden. In-situ-Versuche im Flugzeug oder an einem Mock-up im Maßstab 1/1 sind im Rahmen dieser Arbeit wirtschaftlich nicht darstellbar. Für die Validierung werden aus diesem Grund Modellversuche durchgeführt, die den untersuchten Aufbau realitätsnah skaliert nachbilden. Die Versuche werden im Maßstab 1/10 zum Originalmaßstab durchgeführt.

Für eine direkte Vergleichbarkeit von Modell und Experiment ist die geometrische und strömungsmechanische Ähnlichkeit Voraussetzung. Strömungen sind dann einander ähnlich, wenn die geometrischen und strömungsmechanischen Kenngrößen zueinander proportional sind. Die Ähnlichkeitstheorie wird beispielsweise von Sigloch ausführlich beschrieben [92]. Die Dimensionsanalyse als Grundlage der Ähnlichkeitstheorie wird u.a. von Sonin dargestellt [93].

Die strömungsmechanische Ähnlichkeit ist dann gegeben, wenn sowohl die kinematischen als auch die thermischen Kenngrößen einander proportional sind. Die für Raumluftströmungen oft verwendeten Ähnlichkeitskennzahlen sind die Reynoldszahl Re , die Prandtlzahl Pr und die Archimedeszahl Ar . In dieser Arbeit treten zur Komplexitätsreduktion Temperaturunterschiede oder Wärmeübergänge innerhalb der Geometrie nicht auf. Die Betrachtungen werden für den isothermen Fall durchgeführt. Die freie Konvektion kann daher vernachlässigt werden, wodurch Auftriebskräfte keinen Einfluss ausüben, sodass eine Einhaltung der Archimedeszahl nicht zu beachten ist.

Die Reynoldszahl ist die wichtigste Kennzahl der Fluidmechanik. Sie beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Viskositätskräften:

$$Re = \frac{u_0 l}{\nu} \quad (3-9)$$

Hierbei ist u_0 die Einströmgeschwindigkeit, l eine charakteristische Länge und ν die kinematische Viskosität.

Die Prandtlzahl ist definiert als das Produkt aus kinematischer Viskosität und Wärmekapazität:

$$Pr = c_p \nu \quad (3-10)$$

Hierbei ist c_p die spezifische Wärmekapazität. Für die Experimente in der vorliegenden Arbeit wird wie im Modell Luft als Arbeitsfluid verwendet, sodass die Einhaltung der Prandtlzahl garantiert ist.

Die Reynoldszahlen liegen im Originalmaßstab um ca. zwei Größenordnungen über jenen im Modellmaßstab. Für die Validierung des numerischen Modells ist es daher von Bedeutung, die Eignung des numerischen Modells für unterschiedliche Reynoldszahlen zu überprüfen. Im Fall von Raumluchtströmungen, die mit hohem Impuls durch einen Einlassstrahl belüftet werden, ist die Strömung meist turbulent. Müllejans zeigt mit Modellversuchen verschiedener Maßstäbe, dass der Einfluss von Re auf die Strömung klein ist [94]. Auch Nielsen kann zeigen, dass die Einhaltung von Re nur bei gering turbulenten Strömungen von Bedeutung ist [95, 96, 97]. In der Praxis ergeben sich für höhere Einlassströmungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Einlassreynoldszahlen Re_0 ähnliche Turbulenzstrukturen. Übersteigt Re_0 einen kritischen Wert, so führt eine weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit am Einlass nicht mehr zu einer Veränderung von Re_{rm} im Inneren des Strömungsgebietes. Ebenso wird der Transport von thermischer Energie ab einer kritischen Reynoldszahl von den turbulenten Strukturen und Wirbeln dominiert, sodass auch der Wärmetransport von Pr unabhängig wird.

Es werden für die Validierung in der vorliegenden Arbeit folgende Annahmen getroffen:

- Die Untersuchungen für die Entwicklung und Validierung eines numerischen Modells werden im Modellmaßstab durchgeführt. Die Validierungsexperimente werden im gleichen skalierten Modellmaßstab durchgeführt, wodurch eine geometrische und strömungsmechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und Experiment gegeben ist.
- Die Übertragbarkeit der im Modellmaßstab erarbeiteten Erkenntnisse auf den Originalmaßstab wird anschließend überprüft. Hierzu wird das zuvor validierte numerische Modell verwendet. Da die dem numerischen Modell zugrundeliegenden Gleichungen skalenerunabhängig gelten, ist dies möglich.

Die Validierung des numerischen Modells im skalierten Maßstab zeigt nicht die strömungsmechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und Original, sondern zwischen numerischem Modell und Experiment des gleichen Maßstabs. Die verwendeten strömungsmechanischen Gleichungen gelten aber skalenerunabhängig sowohl im Modell als auch im Original. Unabhängig von der charakteristischen Ausprägung des Strömungsfeldes kann also mittels des numerischen Modells der Stofftransport im auf Originalmaßstab skalierten Frachtraum untersucht werden.

Für die Validierung des numerischen Modells ist daher neben der grundsätzlichen Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment auch zu zeigen, dass das numerische Modell unabhängig von der Einlassreynoldszahl Re_0 die Strömung korrekt beschreiben kann. Die Validierungsversuche in dieser Arbeit werden aus diesem Grund mit den zwei verschiedenen Belüftungsfällen B1 und B2 durchgeführt, welche mit den numerischen Simulationen verglichen werden. Aufgrund verschiedener

Einströmgeschwindigkeiten ergeben sich verschiedene Einlassreynoldszahlen. Es werden Re_0 von 2.570 (Fall B1) und 10.280 (Fall B2) betrachtet.

3.2.2 Frachtraummodell

Anforderungen

Die Hauptanforderung an das Frachtraummodell ist es, eine Validierung der Simulationsergebnisse aus CFD-Berechnungen zu ermöglichen. Es ergeben sich folgende daraus abgeleitete Anforderungen:

- Erstellen einer realitätsnahen Abbildung der Geometrie des Frachtraums, der Geometrie der Belüftungseinlässe und -auslässe sowie der Geometrie der Beladung. Vereinfachung der Geometrie zur Reduzierung des numerischen Aufwands unter Verwendung der für das Strömungsfeld relevanten Elemente. Entwicklung einer generischen Geometrie, die stellvertretend für Großraumflugzeug-Frachträume verwendet werden kann. Für das Studium von Einflussparametern ist eine flexible Veränderung der Belüftungseinlässe und -auslässe sowie der Beladung vorzusehen.
- Der Maßstab ist festzulegen. Dieser sollte möglichst groß gewählt werden, um LDA-Messungen gut zu ermöglichen, dabei aber die zur Verfügung stehenden Laborflächen berücksichtigen.
- Für die Validierung kommt in dieser Arbeit das optische LDA-Messverfahren zur Anwendung. Daraus ergibt sich die Anforderung der optischen Zugänglichkeit des Frachtraummodells.

Modell

Das für Validierungszwecke verwendete Frachtraummodell wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit an der BAM, Fachgruppe „Gefahrguttanks und Unfallmechanik“ konstruiert, gefertigt und aufgebaut. Die Konstruktion ist vollständig in 3D-CAD (Siemens Solid Edge®) ausgeführt, um einerseits ein digitales Modell der Geometrie zur Verwendung in ANSYS® zur Verfügung zu haben und andererseits eine exakte Fertigung der Einzelteile zu ermöglichen. Abbildung 3-1 zeigt die Dimensionen des Modells und die Lage des verwendeten Koordinatensystems. Die als Beladung des Modells verwendeten ULD bestehen aus Polyurethan und wurden aus einem einzelnen Block mittels CNC gefräst, um eine definierte Oberflächenqualität zu realisieren. Die Außenwände des Frachtraum-Modells sind aus Polymethylmethacrylat gefertigt, was die optische Zugänglichkeit des Aufbaus für die LDA-Messtechnik erlaubt¹¹. Die Einzelteile des Modells sind miteinander verschraubt. Das innere Volumen des Modells erreicht dadurch eine Dichtigkeit bei Druckbeaufschlagung.

¹¹ Polymethylmethacrylat („Plexiglas“) ist ein transparenter, thermoplastischer Polymer. Mit einer mittleren Brechzahl von 1,491 bei einer Lichtwellenlänge von 587,6 nm sind die optischen Eigenschaften von Polymethylmethacrylat mit denen von Mineralglas vergleichbar.

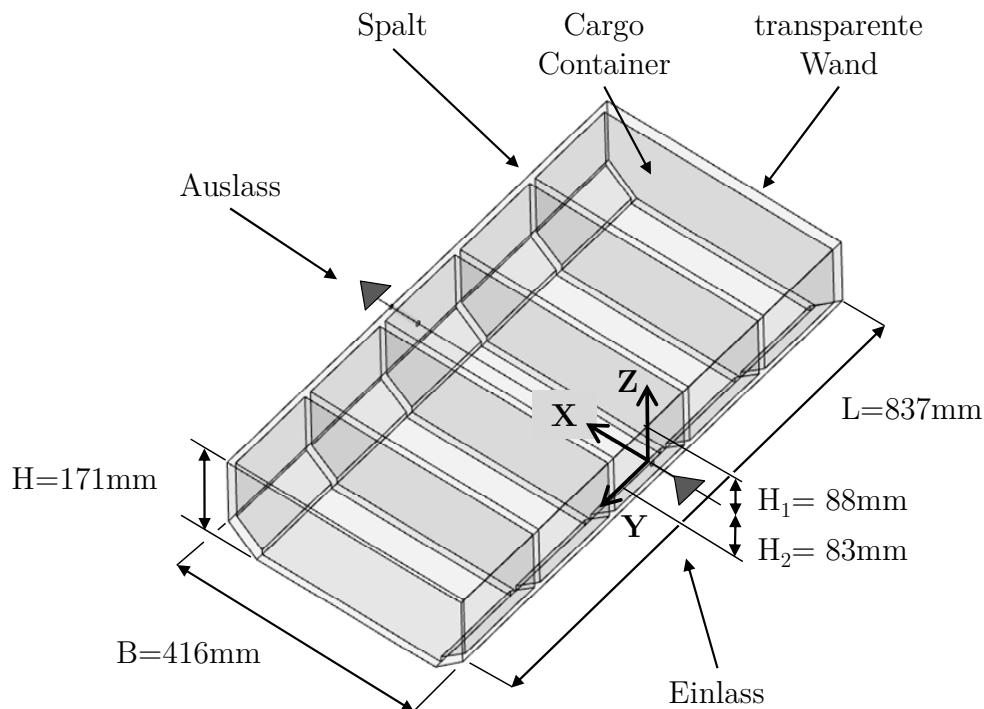


Abbildung 3-1: Abmessungen des skalierten Frachtraummodells im Maßstab 1/10

3.2.3 Versuchsaufbau

Modellträger

Für den Versuchsaufbau wird ein Modellträger gefertigt, der die Traversiereinrichtung, die Optik des LDA-Systems und das Frachtraummodell in einen Versuchsaufbau integriert. Der Modellträger ist aus Aluminiumprofilen gefertigt und erlaubt eine winkelexakte und reproduzierbare Ausrichtung der Laseroptik zum Frachtraummodell, siehe Abbildung 3-2. Eine schematische Gesamtansicht des Versuchsaufbaus mit Frachtraum-Modell, Modellträger, Traversen und Messtechnik zeigt Abbildung 3-3.

Traversen

Für eine effiziente Messung vieler Messpunkte werden zwei Traversensysteme verwendet, die eine exakte und gut reproduzierbare Positionierung der LDA-Optik erlauben. Punkte auf den Koordinatenachsen x und z können gemäß einem definierten Punktgitter automatisiert positioniert werden. Hierfür wird ein kommerzielles Traversensystem der Firma Dantec Dynamics[®] verwendet. Messpunkte auf der y-Koordinatenachse werden manuell positioniert, hierfür wird ein Spindel-Lineartisch der Firma IGUS[®] verwendet. Die technischen Daten der Traversensysteme sind in Tabelle 3-2 aufgeführt.

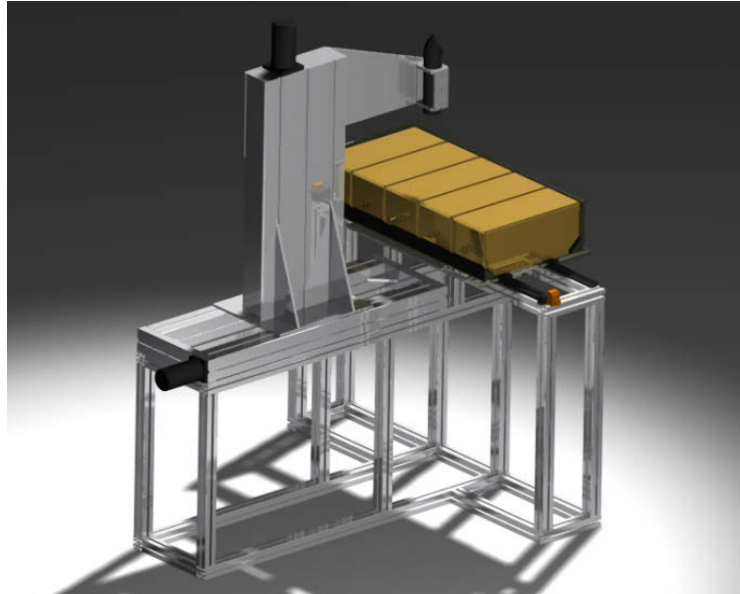


Abbildung 3-2: CAD-Ansicht des verwendeten Versuchsaufbaus bestehend aus Modellträger, Traversen und Frachtraummodell

Tabelle 3-2: Abmessungen und technische Daten der verwendeten Traversensysteme

Bezeichnung	Wert	Einheit
Verfahrweg x-Koordinate	590	mm
Verfahrweg y-Koordinate	840	mm
Verfahrweg z-Koordinate	690	mm
Positioniergenauigkeit x/z-Achse	0,1	mm
Positioniergenauigkeit y-Achse	0,1	mm
Verfahrgeschwindigkeit x-Koordinate	10	mm/s
Verfahrgeschwindigkeit z-Koordinate	10	mm/s

Belüftung und Seeding

Das Frachtraummodell wird über eine Labor-Druckluftversorgung belüftet. Der dem Modellfrachtraum zugeführte Einlass-Luftmassenstrom wird einem Druckluft-System mit 10 bar Systemdruck entnommen, welches mittels eines Druckreglers auf 2 bar reduziert wird. Über ein Volumenstrom-Regelventil ist der Luftmassenstrom auf den benötigten Vorgabewert reproduzierbar einstellbar. Ein Druckluftfilter entfernt in der Druckluft vorhandene Ölrückstände. Der Einlassvolumenstrom wird durch einen thermischen Volumenstromsensor der Firma Festo® ermittelt. Dem Einlassluftmassenstrom werden Seeding-Partikel für das LDA-System zugesetzt, bevor das Luft-Partikel-Gemisch in das Frachtraummodell einströmt. Die Seeding-Partikel werden mittels eines Aerosolgenerators der Firma Topas® erzeugt, der Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) zu einem Aerosol langlebiger Partikel mit einer mittleren Partikelgröße von $0,2 \times 10^{-6}$ mm zerstäubt.

3.2.4 Laser-Doppler-Messsystem

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im Frachtraummodell wird das LDA-Verfahren verwendet. Eine ausführliche Darstellung des Messprinzips geben Leder [98, 99] sowie Zhang [100]. Das LDA-Verfahren ist ein berührungsloses, punktuelles laseroptisches Messverfahren, welches eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung bei geringen Messfehlern bietet.

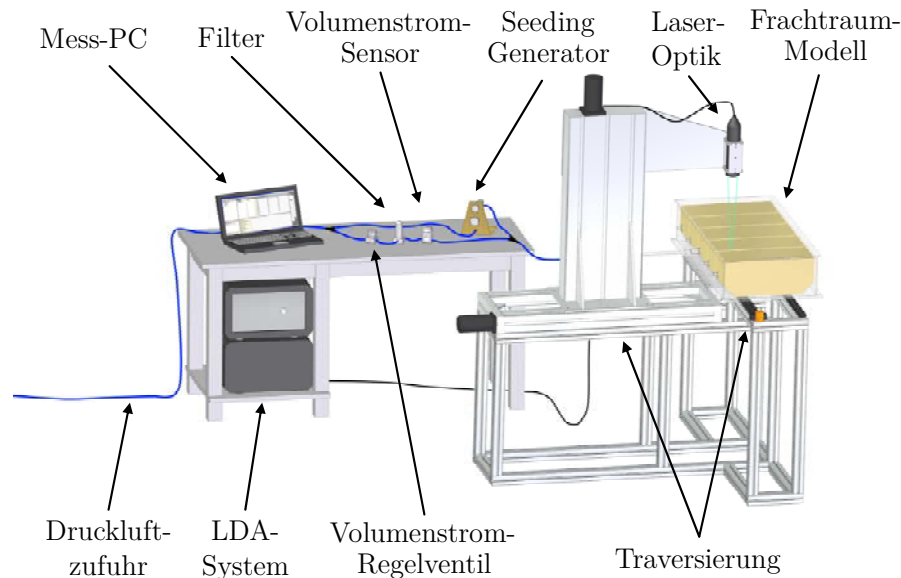


Abbildung 3-3: Schematische Gesamtansicht des Versuchsaufbaus mit Frachtraum-Modell, Modellträger, Traversen und Messtechnik

Mit dem LDA-Verfahren werden Strömungsgeschwindigkeiten nicht direkt gemessen, sondern aus der Geschwindigkeit von in der Strömung mitgeführten Partikeln ermittelt. Unter der Annahme, dass Partikel der Strömung ohne Schlupf folgen, kann aus der Partikelgeschwindigkeit die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Die zeitliche Auflösung der Messrate ist in der Regel durch die Anzahl von Seeding Partikeln begrenzt und nicht durch das Datensampling. Vorteile des Verfahrens sind weiterhin, dass die zu untersuchende Strömung nicht durch das LDA-Verfahren beeinflusst wird und dass das Messverfahren seinerseits nicht durch die Strömung beeinflusst wird. Der prinzipielle Aufbau des in dieser Arbeit verwendeten LDA-Messaufbaus ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

Das verwendete LDA-Messsystem ist ein kommerziell erhältliches Laser-Doppler-Anemometer der Firma Dantec Dynamics® zur Messung einer Geschwindigkeitskomponente. Das LDA-System besteht aus einer Lasereinheit, einer über Glasfaser-Lichtleiter angeschlossenen Optikeinheit (Dantec® Flowlite 1D), einer Hardwareeinheit zur Signalwandlung (Dantec® BSA F60) und einem Mess-PC zur Signalverarbeitung. Das LDA-System arbeitet mit einem Laser, der Laserlicht der

Wellenlänge 532 nm emittiert und im Kreuzstrahlverfahren in Rückwärtsstreuung angeordnet ist [101]. Die Optik teilt das eingehende Laserlicht in zwei Lichtstrahlen auf und bringt es im Abstand der Brennweite von 160 mm zum Schnitt, wodurch ein Messvolumen entsteht. Ebenfalls in die Optik integriert ist ein Photodetektor, der das durch Seeding-Partikel zurückgestreute Licht erfasst und an den BSA-Datencontroller weiterleitet. Dieser wandelt das optische Signal in ein elektrisches Signal zur Weiterverarbeitung durch die BSA-Flow Software von Dantec Dynamics® [102].

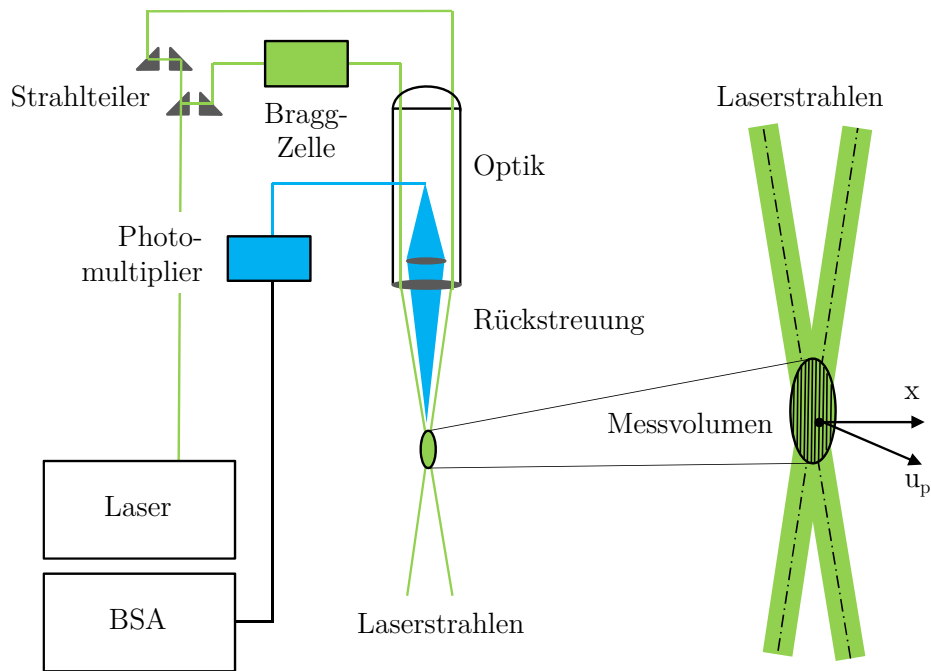


Abbildung 3-4: Messaufbau des verwendeten LDA-Systems der Firma Dantec Dynamics®

Tabelle 3-3 gibt eine Übersicht über die geometrischen Kenngrößen des verwendeten LDA-System. Diese entstammen den Herstellerinformationen, beziehungsweise wurden nach Zhang et al. [100] berechnet.

Tabelle 3-3: Geometrische Größen des verwendeten LDA-Systems

Größe	Wert	Einheit
Wellenlänge	532	nm
Strahlabstand	38,4	mm
Brennweite	160	mm
Strahlschnittwinkel	6,84	Grad
Strahldurchmesser (Ausgang)	2,2	mm
Strahldurchmesser (Messvolumen)	0,0475	mm
Messvolumenbreite (Δx)	0,0473	mm
Messvolumenlänge (Δz)	0,3998	mm

3.2.5 Versuchsdurchführung

Versuchsbedingungen

Die CFD-Simulationen werden mit voller Beladung des Frachtraums durchgeführt. Dies stellt das definierte Standard-Transportszenario dar. Um die Vergleichbarkeit von CFD-Ergebnissen mit experimentellen Ergebnissen zu gewährleisten, werden die LDA-Messungen ebenfalls mit voller Beladung des Frachtraums realisiert.

Die Messungen werden für zwei verschiedene Belüftungsfälle durchgeführt. Diese Belüftungsfälle B1 und B2 unterscheiden sich in ihren Einlassvolumenströmen und damit in den effektiven Luftwechselraten. Der Belüftungsfall B1 wird bei einem Luftvolumenstrom von 15 l/min durchgeführt, was einer Luftwechselrate von ca. 15,5 1/h und einer Reynoldszahl Re_0 von 2.570 entspricht. Der Belüftungsfall B2 wird bei einem Luftvolumenstrom von 60 l/min durchgeführt, was zu einer Luftwechselrate von 62,2 1/h und einer Reynoldszahl Re_0 von 10.280 führt. Die Parameter der Belüftungsfälle sind in Tabelle 3-6 aufgeführt.

Die Versuchsbedingungen sind durch eine gleichbleibende Umgebungstemperatur während der durchgeführten Versuche konstant. Weitere Umwelteinflüsse sind ausgeschlossen, da der Modellfrachtraum ein geschlossenes System darstellt, welches nur am Einlass durch die Einspeisung von Labordruckluft und am Auslass eine offene Systemgrenze aufweist. Der Einlass ist mit der Labordruckluftleitung verbunden. Die Labordruckluft weist weitgehend konstante Werte für Temperatur und Druck über die Zeit auf. Der Auslass ist mit der Laborabluft verbunden.

Messpositionen

Die LDA-Messungen erfolgen an definierten Positionen im Modellfrachtraum. Die Messungen werden in vier verschiedenen Ebenen des Frachtraums durchgeführt, wie in Abbildung 3-5 dargestellt. Die exakten Positionen der Messebenen sind in Tabelle 3-4 aufgeführt.

Tabelle 3-4: Messebenen für die zweidimensionale Auswertung von LDA-Messungen

Position	X / mm	Y / mm	Z / mm	Anzahl Messpunkte
Ebene E-L	10 ... 390	+83	-70 ... +70	585
Ebene E-R	10 ... 390	-83	-70 ... +70	585
Ebene E-V	+3	-80 ... +80	-30 ... +80	192
Ebene E-H	+413	-80 ... +80	-30 ... +80	192

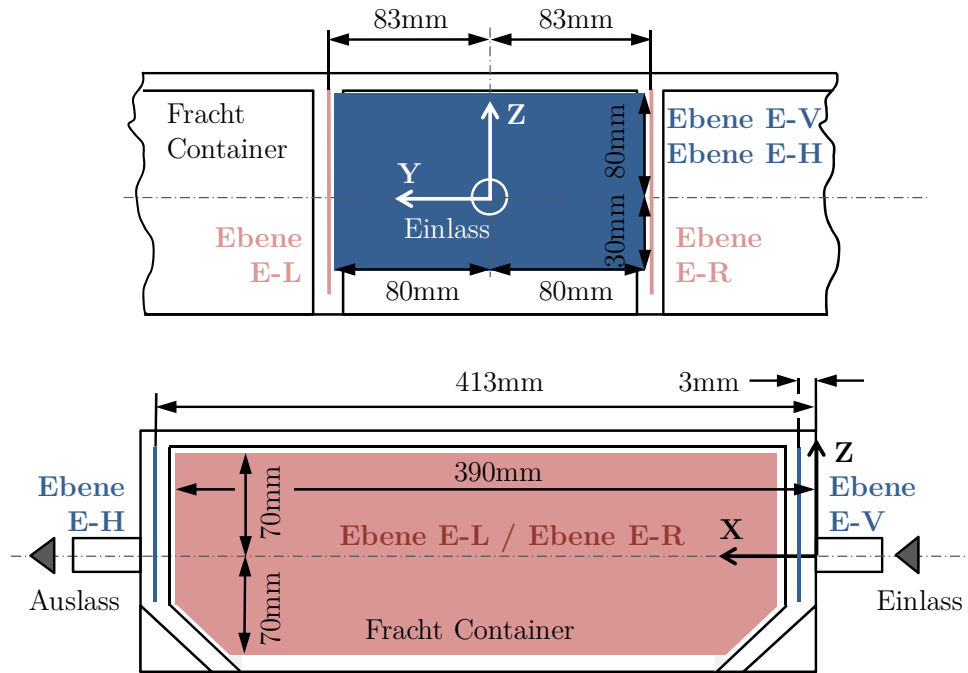


Abbildung 3-5: Lage der Messebenen E-V und E-H (x-y-Ebene) sowie der Messebenen E-R und E-L (x-z-Ebene)

Die im folgenden Abschnitt dargestellten Vergleiche zwischen LDA-Messungen und CFD-Simulationen werden eindimensional und zweidimensional durchgeführt. Für die zweidimensionalen Vergleiche werden die Messebenen E-L, E-R sowie E-V und E-H verwendet, für die eindimensionalen Vergleiche die Linien M1 bis M4 (siehe Abbildung 3-6). Die exakten Positionen ergeben sich aus Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Messpositionen für die eindimensionale Auswertung von LDA-Messungen

Position	X / mm	Y / mm	Z / mm	Anzahl Messpunkte
Linie M1	3	-50...+50	0	10
Linie M2	10...390	+83	0	39
Linie M3	41	+83	-70...+70	15
Linie M4	210	+83	-70...+70	15
Linie M5	375	+83	-70...+70	15

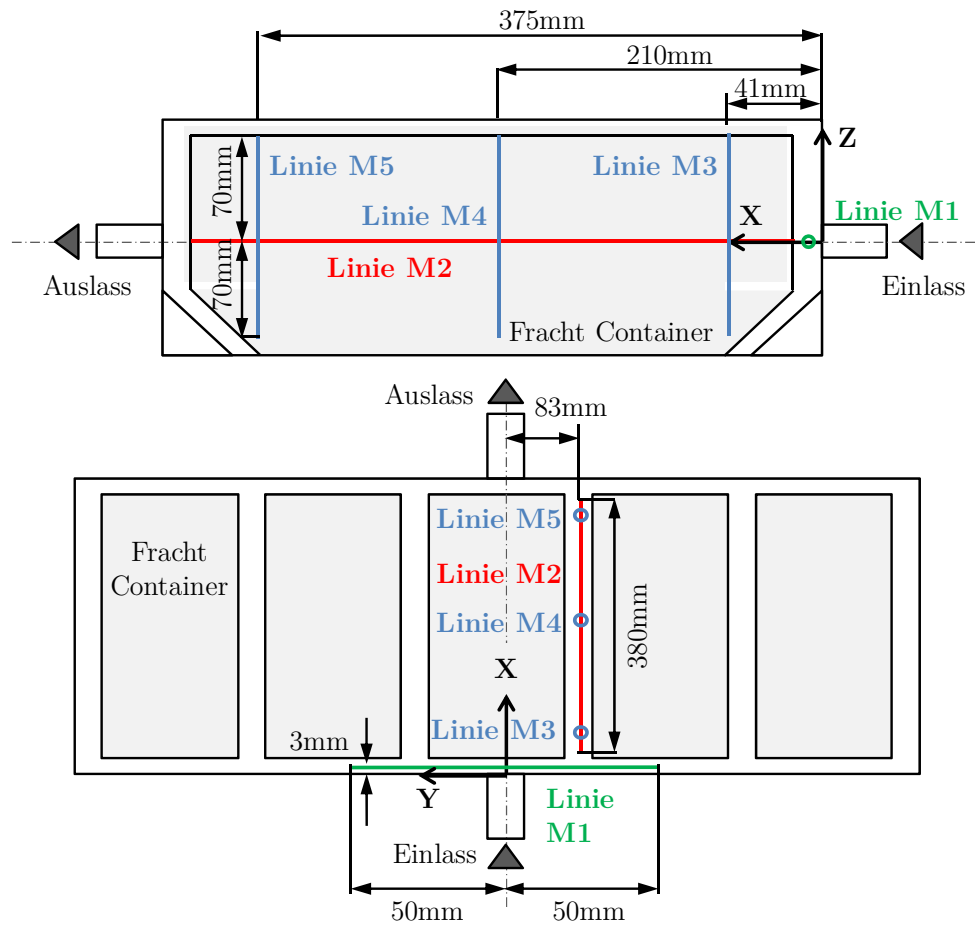


Abbildung 3-6: Lage der Messlinien M1 bis M5 (x-z-Ebene) sowie der Messlinien M1 bis M5 (x-y-Ebene)

Messprogramm

Das Messprogramm umfasst LDA-Messungen in den beschriebenen Ebenen E-L bis E-H gemäß Tabelle 3-6. Für beide Belüftungsfälle ist der Einlass und Auslass mittig angeordnet, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Die im Messprogramm verwendeten Betriebspunkte und Messorte ergeben sich aus Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Messprogramm für LDA-Messungen mit Betriebspunkten und Messorten

Belüftungsfall	Einlass Volumenstrom	Re Einlass	Luft- wechselrate	Mess- ebenen	Anzahl Messpunkte
B1	15 l/min	2.570	15,5 1/h	E-L	585
				E-R	585
				E-V	192
				E-H	192
B2	60 l/min	10.280	62,2 1/h	E-L	585
				E-R	585
				E-V	192
				E-H	192

3.2.6 Bewertungsgrößen

Vergleichsgrößen

Als Vergleichsgrößen zur Bewertung der Versuchsergebnisse werden die zwei Komponenten u und v des Geschwindigkeitsvektors \vec{U} sowie dessen Schwankungsgeschwindigkeiten u' und v' betrachtet. Für die Betrachtungen in der Ebene E-L und E-R wird u verwendet, für die Betrachtungen in der Ebene E-V und E-H wird v verwendet. Während die Geschwindigkeit ein Maß für die grundlegende Charakterisierung der Strömung ist, dient die Schwankungsgeschwindigkeit als Maß für die Turbulenz der Strömung. Nach [77] kann der Turbulenzgrad aus der Schwankungsgeschwindigkeit bestimmt werden:

$$Tu = \frac{\sqrt{1/3(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{\vec{U}} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\vec{U}} \quad (3-11)$$

Hierbei sind u , v , w die Geschwindigkeitskomponenten der Strömung, \vec{U} der Geschwindigkeitsvektor und u' die Schwankungsgeschwindigkeit gemäß Gleichung (3-6).

Die Schwankungsgeschwindigkeit wird direkt aus den LDA-Messdaten bestimmt. Die aus CFD-Simulationen ermittelte Schwankungsgeschwindigkeit wird aus der turbulenten kinetischen Energie k berechnet [77]:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3-12)$$

Reynoldszahlen

Aufgrund der unterschiedlichen Einlassvolumenströme der beiden betrachteten Belüftungsfälle B1 und B2 ergeben sich Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen innerhalb des Frachtraums. Zu unterscheiden sind vor allem der Einlassbereich, gekennzeichnet durch die Einlassreynoldszahl Re_0 , und der Bereich im Frachtrauminneren, gekennzeichnet durch die Reynoldszahl im Raum Re_{rm} . Für die Einlassreynoldszahl Re_0 wird als charakteristische Größe der Durchmesser d_0 der Einlassöffnung verwendet, für die Reynoldszahl Re_{rm} wird als charakteristische Größe der hydraulische Durchmesser d_{rm} des Frachtraums verwendet [103, 104].

$$Re_0 = \frac{u_0 d_0}{\nu} \quad (3-13)$$

$$Re_{rm} = \frac{u_{rm} d_{rm}}{\nu} \quad (3-14)$$

Der Bereich am Einlass ist durch die Belüftung des Frachtraums mit einem Einlassstrahl unterschiedlich großer Impulse geprägt. Für den Fall B1 ergeben sich kleinere Werte für Re_0 (2.570) und für den Fall B2 ergeben sich größere Werte für Re_0 (10.280). In Tabelle 3-7 sind die gemittelten Reynoldszahlen am Einlass, im gesamten Frachtraum und im ersten Spalt ausgehend vom Einlass aufgeführt. Die Reynoldszahlen werden mittels analytisch bestimmter mittlerer Geschwindigkeiten berechnet. Die Bestimmung der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit über die Massenerhaltung mittels der Kontinuitätsgleichung ergibt für den Fall B1 unter Verwendung des hydraulischen Durchmessers des Frachtraumes einen Wert von 0,013 m/s. Für den Fall B2 ergibt sich für die mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit 0,054 m/s. Die analytisch bestimmten Geschwindigkeiten korrelieren dabei sehr gut mit den mittels LDA gemessenen Werten.

Tabelle 3-7: Lokale Reynoldszahlen im Frachtraum für Belüftungsfall B1 und B2

Ort	Fall	u / m/s	d / m	ν / m ² /s	Re
Einlass	B1	5,00	0,008	1,558E-05	2.570
Frachtraum	B1	0,013	0,16	1,558E-05	139
Spalt	B1	0,05	0,16	1,558E-05	466
Einlass	B2	20,0	0,008	1,558E-05	10.280
Frachtraum	B2	0,054	0,16	1,558E-05	556
1. Spalt	B2	0,182	0,16	1,558E-05	1865

Das Verhältnis der Reynoldszahlen verschiedener Belüftungsfälle ist entsprechend dem Verhältnis der Einströmgeschwindigkeiten konstant und beträgt $Re_{B2}/Re_{B1}=4$. Der Einfluss von Re_0 auf die lokalen Geschwindigkeiten im Frachtraum zeigt dagegen ein nicht lineares Verhalten wie die entsprechende Untersuchung in Abschnitt 6.1.1 zeigt. Die Strömung im Frachtrauminneren ist insgesamt in beiden Belüftungsfällen durch eher kleine globale Reynoldszahlen Re_{rm} geprägt. Für Regionen mit $Re_{rm}<100$ ist dabei nur noch eine sehr geringe Turbulenz zu erwarten [103]. Analog zu den stark variierenden Reynoldszahlen ist das Turbulenzniveau im Frachtraum ebenfalls unterschiedlich stark ausgeprägt, im Frachtrauminneren aber relativ gering, vergleiche auch Abschnitt 5.1.

Normierungsgrößen

In dieser Arbeit werden die betrachteten Strömungsgrößen (Geschwindigkeiten, Schwankungsgeschwindigkeiten) und die verwendete Längen dimensionslos dargestellt. Hierfür ist eine jeweils geeignete Normierungsgröße zu definieren. Die betrachteten Längen werden jeweils mit der Frachtraumbreite B , normiert (siehe Abbildung 3-1), da dies eine charakteristische Länge in Hauptströmungsrichtung darstellt. Mögliche Größen zur Normierung der Geschwindigkeiten sind die Einlassgeschwindigkeit u_0 und die mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit u_{rm} . In der Literatur wird für

Problemstellungen in der Lüftungstechnik üblicherweise u_0 als Normierungsgröße verwendet [103, 104]. Als problematisch bei der Verwendung von u_0 als Normierungsgröße ist ein veränderliches Betrachtungsvolumen zu bewerten. Es ergibt sich dadurch eine unterschiedliche Aussagekraft für das Verhältnis von u/u_0 . Ist das Volumen sehr klein, so führt dies zu verhältnismäßig großen Geschwindigkeiten u . Ist das Volumen sehr groß, so führt dies zu sehr kleinen Geschwindigkeiten u und das Verhältnis u/u_0 geht gegen Null.

Als weitere Normierungsgröße kann die mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit verwendet werden. Die mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit u_{rm} ist wesentlich abhängig von u_0 und dem Beladungszustand des Frachtraums. d.h. vom betrachteten Volumen. Bei Verwendung konstanter Einströmgeschwindigkeiten u_0 und einer Variation der betrachteten Volumina könnte die Verwendung von u_{rm} vorteilhaft sein, da das Verhältnis u/u_{rm} sich analog zum Verhältnis der Volumenänderungen verhalten wird. Bei kleinem Volumen steigt u und u_{rm} an und das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten bliebe vergleichbar wie für große Volumina. Wie gezeigt wurde, gilt dies nicht für das Verhältnis von u/u_0 .

Die Problematik veränderlicher Volumina tritt in den folgenden Betrachtungen nicht auf. In der vorliegenden Arbeit ist nicht das Frachtraumvolumen variabel (vergleiche Abschnitt 2.6.3), sondern die Einströmgeschwindigkeiten anhand der Belüftungsfälle B1 und B2. Sowohl das Verhältnis von u/u_{rm} als auch von u/u_0 ändert sich dabei jeweils entsprechend zur Änderung von $u_0(B2)/u_0(B1)$. Die genannten möglichen Einschränkungen bei der Auswahl einer Normierungsgröße sind daher nicht relevant. Vielmehr führt die Verwendung einer der beiden Normierungsgrößen lediglich zu einer quantitativen Veränderung des Verhältnisses aus Geschwindigkeit und Normierungsgröße, nicht aber zu einer qualitativen Veränderung. Die Einströmgeschwindigkeit u_0 treibt die Strömung im Raum an und ist in einigen Untersuchungen die betrachtete Einflussgröße. Damit stellt sie eine physikalisch sinnvolle Referenzgröße für den vorliegenden Fall dar. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird daher die Geschwindigkeit u mit der Einströmgeschwindigkeit u_0 normiert.

Validierungsgrößen

Zur Validierung werden drei Kriterien verwendet. Zunächst wird die Symmetrie als Kriterium betrachtet. Es wird hierbei die Symmetrie des Strömungsfeldes zur Mittelachse der Geometrie untersucht, welche aufgrund der geometrischen Symmetrie des Frachtraumes zu erwarten ist. Als zweites Validierungskriterium werden die Verläufe und Beträge der betrachteten Größen verglichen. Hierzu werden die dargestellten Größen an den definierten Messpositionen des Strömungsfeldes qualitativ und quantitativ verglichen. Als ein drittes Validierungskriterium wird eine Spektralanalyse der LDA-Messdaten durchgeführt. Die Spektralanalyse der LDA-Messdaten kann dazu beitragen, das Strömungsfeld auf periodische

Strömungsstrukturen wie beispielsweise wiederkehrende Wirbel zu analysieren, welche durch eine stationäre numerische Simulation unter Umständen nicht wiedergegeben werden

3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Für die Untersuchung von Innenraumströmungen ist die Verwendung von CFD derzeit das Mittel der Wahl. Eine experimentelle Validierung numerischer Berechnungen mittels vergleichbarer Versuche stellt den Stand der Technik dar.
- Bei der Simulation mittels CFD werden die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen numerisch gelöst. Das Schließungsproblem macht bei Verwendung von RANS eine Turbulenzmodellierung notwendig.
- Bei der Verwendung von Wirbelviskositätsmodellen wird die Turbulenz mittels der Boussinesq-Approximation vereinfacht und über die Wirbelviskosität modelliert. Hierfür wird die Turbulenz als isotrop vorausgesetzt, was die Genauigkeit der Modelle einschränkt.
- Reynolds-Spannungsmodelle bieten zum Teil bessere Voraussagen der Turbulenz durch die Verwendung zusätzlicher, aus den Navier-Stokes-Gleichungen hergeleiteter Gleichungen für den Reynolds-Spannungstensor, was zu deutlich erhöhtem numerischen Rechenaufwand führt.
- Die Validierung der CFD-Simulationen wird mittels Modellversuche im Maßstab 1/10 durchgeführt, was den experimentellen Aufwand begrenzt.
- Die geometrische Ähnlichkeit der Versuche im Modellmaßstab zu den Gegebenheiten im Originalmaßstab ist durch feste Umrechnungsgrößen gegeben.
- Die Verwendung des gleichen Maßstabs zwischen numerischem Modell und Experiment garantiert die Einhaltung von Re in Modellversuchen. Die Einsetzbarkeit des numerischen Modells im Originalmaßstab wird mittels Validierungsversuchen für unterschiedliche Re überprüft. Damit wird die Unabhängigkeit der numerischen Lösung von Re gezeigt.
- Für die strömungsmechanische Ähnlichkeit von Simulationen im Modellmaßstab zu solchen im Originalmaßstab ist die Einhaltung der Prandtlzahl durch Verwendung des gleichen Fluids gegeben. Die Einhaltung der Archimedeszahl ist aufgrund isothermer Betrachtungen nicht relevant.
- Für die experimentellen Untersuchungen wird ein Frachtraum-Modell im Maßstab 1/10 angefertigt.
- Das Modell wird mittels eines kommerziellen 1D-LDA-Systems der Firma Dantec Dynamics® vermessen. DEHS-Partikel werden der Strömung als Seeding zugesetzt.

- Die Messungen erfolgen an definierten Messpositionen, welche relevante Positionen im Frachtraum abbilden.
- Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wird das im Rahmen dieser Arbeit verwendete LDA-Messsystem vorgestellt. Der verwendete LDA-Messaufbau wird dargestellt.
- Als Vergleichsgrößen zur Bewertung der Versuchsergebnisse werden die Komponenten u und v des Geschwindigkeitsvektors \vec{U} sowie dessen Schwankungskomponenten u' und v' betrachtet.
- Insbesondere die Einlassreynoldszahl Re_0 , und die Reynoldszahl im Frachtrauminneren Re_{rm} charakterisieren die Strömungsverhältnisse im Frachtraum. Die auftretenden Reynoldszahlen liegen in einem weiten Bereich zwischen ca. 100...10.000, wobei die Reynoldszahl in Frachtrauminneren in deutlich geringerem Maße variiert.
- Als Normierungsgrößen werden für Längen die Frachtraumbreite B , sowie für Geschwindigkeiten die Einströmgeschwindigkeit u_0 verwendet.
- Als Validierungskriterium werden die Symmetrie, die Verläufe und Beträge der betrachteten Strömungsgrößen sowie die Spektralanalyse der LDA-Messungen bewertet.

4 Modelle

Die vorliegenden Untersuchungen werden mittels RANS-Simulationen durchgeführt. Vorangegangene Forschungsarbeiten der BAM zeigen, dass eine experimentelle Untersuchung der Stoffausbreitung im Frachtraum von Flugzeugen im Originalmaßstab nicht zielführend ist [105]. Derartige Versuche sind sehr kostenintensiv sowie logistisch und zulassungstechnisch aufwendig. Die hohen Kosten reduzieren die mögliche Anzahl der Versuche auf ein Maß, welches die statistische Aussagekraft und damit die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse stark einschränkt.

Gegenstand dieses Kapitels ist die numerische Modellierung der betrachteten Frachtraumströmung. Hierzu gehört die Beschreibung der verwendeten Geometrie, der Randbedingungen, des numerischen Gitters und der verwendeten Einlassquellen. Das numerische Gitter und die Turbulenzmodellierung werden bewertet. Die verwendeten Simulations-Szenarien und die zur Bewertung definierten Indikatoren werden dargestellt.

4.1 Numerisches Modell

4.1.1 Geometrie

Das generische Frachtraum-Modell bildet den Unterflurfrachtraum eines Flugzeuges auf Basis eines Airbus® A340¹² nach. Der Maßstab beträgt 1/10 der Originalgröße. Der Aufbau des Modell-Frachtraums ist ausgehend von Einlass und Auslass symmetrisch zur Längsachse des Flugzeugs. Um die Belüftungssituation und den Stofftransport in wählbaren Abständen ausgehend vom Einlass und Auslass bewerten zu können, bildet die Basis des Modells eine Scheibe des Frachtraumes mit der Breite eines Frachtcontainers. Zur Realisierung von weiteren Spalten werden zu jeweils jeder Seite zwei weitere Container hinzugenommen, siehe Abbildung 4-1. Damit ergibt sich die Länge des Frachtraums durch die Beladung mit fünf ULD des Typs LD6¹³. Das freie

¹² Das Großraumflugzeug Airbus A340 des Herstellers EADS ist ein vierstrahliges Verkehrsflugzeug, von dem seit den 1990er Jahren 375 Stück in Dienst gestellt wurden. In vielen Teilen baugleich mit dem Typ A340 ist der Typ A330, von dem bis 2012 927 Stück ausgeliefert wurden.

¹³ Ein ULD LD6 ist eine Luftfracht-Ladeeinheit mit einem Volumen von 8,8 m³. Die Kontur ist auf die verfügbaren Abmessungen des Frachtraums abgestimmt und weist an der Unterseite abgeschrägte Kanten auf. Der ULD nimmt nahezu die gesamte Breite des Frachtraums ein und entspricht damit zwei ULD des Typs LD3.

Volumen des Modellfrachtraums im beladenen Zustand beträgt 9,45 l, die frei bleibenden Spalte zwischen den Containern sind dabei ca. 5 ... 12 mm breit.

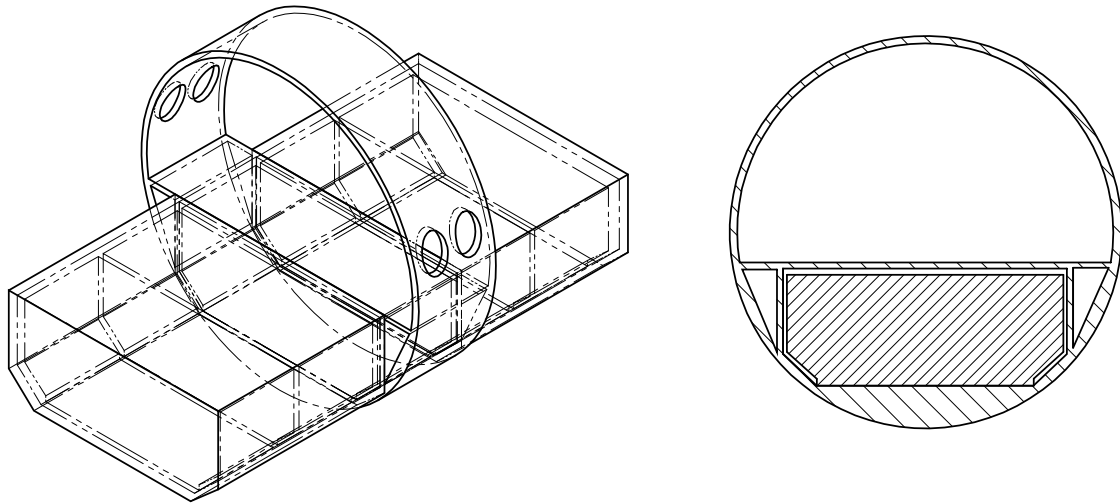


Abbildung 4-1: Aufbau des generischen Modell-Frachtraums in 3D-Ansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

4.1.2 Randbedingungen

Die originalgetreue Abbildung komplexer Einlassgeometrien ist für CFD-Simulationen ebenso wichtig wie aufwendig. Eine möglichst exakte numerische Abbildung der Einlassrandbedingung mit guter Auflösung der Einlassgeometrie liefert dabei nicht zwangsläufig verbesserte Simulationsergebnisse [106], bedeutet aber u.U. einen hohen numerischen Rechenaufwand. Um den Berechnungsaufwand für RANS-Simulationen zu verringern, wurden verschiedene Modelle entwickelt, um die Einlassrandbedingung bei möglichst guter Abbildung zu vereinfachen [107, 108, 109, 110, 111, 112]. Um den Aufwand bei der Modellierung der Einlassrandbedingung zu reduzieren, gleichzeitig aber eine gute Abbildung zu erzielen, wird ein Einlassgeschwindigkeitsprofil mit Vorgabe von Turbulenzparametern als Einlassrandbedingung der Belüftung (B-RB) durch das ECS verwendet, welches mittels LDA-Messungen ermittelt wurde. Für die B-RB gilt ein Massenanteil von eins für Luft. Als Einlassrandbedingung für Gefahrgut (G-RB) werden verschiedene Einlassquellen verwendet (siehe Abschnitt 6.3.3). Als G-RB wird ein Massenstrom mit Vorgabe von Turbulenz- und Richtungseigenschaften definiert, der mittels einer Sprungfunktion ein- bzw. ausgeschaltet wird, um einen Massenstrom gemäß der definierten Szenarien zu ermöglichen (siehe Abschnitt 4.3.1). Für die G-RB gilt ein Massenanteil von eins für Gefahrgut. Die Auslassrandbedingung wird über ein „Opening“ dargestellt, welches als Druckrandbedingung 0 Pa vorgibt. Als Wandrandbedingung wird eine glatte Wand mit Wandhaftbedingung vorgegeben. Aufgrund der symmetrischen Anordnung im Frachtraum wird eine Symmetriebedingung genutzt. Für die Modellierung der Turbulenz wird das SST-k- ω -Modell verwendet, welches auf seine Eignung für den vorliegenden Fall bewertet wird

(siehe Abschnitt 4.2.2). Als Residuenkriterium der numerischen Berechnungen wird für alle Gleichungen 10^{-3} als Maximalwert vorgegeben. Das verwendete Advektionsschema ist ein High Resolution Verfahren.

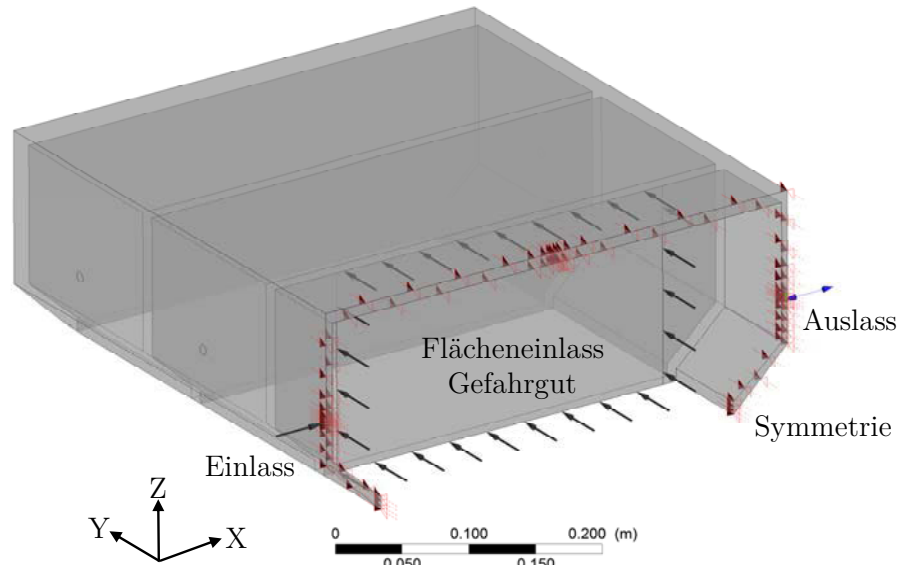


Abbildung 4-2: Darstellung des numerischen Modells mit Randbedingungen

4.1.3 Rechengitter

Für die numerische Lösung der diskretisierten Navier-Stokes-Gleichungen ist ein Gitter mit Stützstellen erforderlich. An den Stützstellen können die gesuchten Variablen berechnet werden. Das Gitter stellt eine Diskretisierung der betrachteten Geometrie dar und teilt diese in eine endliche Anzahl von Kontrollvolumina (Zellen) [77]. Der Einfluss des Gitters auf die numerische Lösung ist insbesondere bei CFD-Simulationen groß. Aus dem Einfluss des numerischen Gitters auf die Rechenergebnisse ergibt sich dessen Güte und Eignung für den betrachteten Fall. Die Herausforderung besteht darin, einen optimierten Kompromiss im Zielkonflikt zwischen einer ausreichend hohen Auflösung der Geometrie mit Volumenelementen und dem daraus resultierenden Berechnungsaufwand zu erzielen.

Für die vorliegende Arbeit wird die Gittergenerierungssoftware Ansys ICEM CFD® (ICEM) verwendet [113]. Bei der Erstellung eines hexastrukturierten Gitters mit ICEM wird die Geometrie mittels einer Block-Topologie in allen drei Dimensionen abgebildet. Nach der Erzeugung der Blocks werden diese verfeinert und durch Schneiden von Kanten und Flächen und Assoziieren von Knotenpunkten möglichst exakt auf die Geometrie angepasst. Nach dem Verblocken der Geometrie kann die Knotenverteilung auf den erzeugten Kanten angepasst werden. Da sich die Gitterlinien hexastrukturierter Gitter nicht kreuzen, werden alle Linien eines Satzes durchgehend nummeriert. So können alle Gitterpunkte mit den drei Indizes i , j und k in ihren Koordinaten

beschrieben werden [77]. Die Anpassung an die vorliegende Geometrie macht die Verwendung von schiefwinkligen Koordinaten notwendig. Hierfür ist eine Koordinatentransformation in die Raumkoordinaten $\zeta = \zeta(x, y, z)$, $\eta = \eta(x, y, z)$ und $\xi = \xi(x, y, z)$ notwendig welche eine Darstellung der schiefwinkligen Koordinaten als Funktion der kartesischen Koordinaten zulässt [114].

Für die Erzeugung des für die vorliegende Arbeit verwendeten Gitters dienen die CAD-Daten der in Abschnitt 3.2.2 dargestellten Frachtraumgeometrie. Das Rechengitter umfasst ein im Wesentlichen quaderförmiges Gebiet mit den Maßen 837 mm x 416 mm x 172 mm. Der Einlass und der Auslass sind mittig positioniert und schließen bündig mit den Wänden der Geometrie ab. Eine Ansicht des Gitters ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

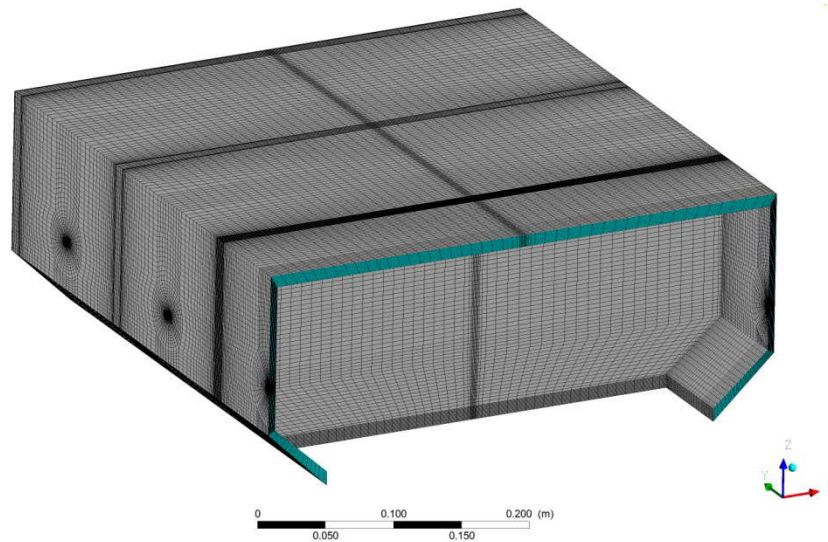


Abbildung 4-3: Iso-Ansicht des hexastrukturierten numerischen Gitters

Als numerisches Gitter wird die Gitterkonfiguration R2 für einkomponentige Simulationen verwendet. Für mehrkomponentige Simulationen wird die Gitterkonfiguration R3 verwendet. Die Randschichtdicke beträgt typischerweise $3,6 \times 10^{-4}B$ (siehe Abbildung 3-1). Der dimensionslose Wandabstand $y^+ < 1$ gilt weitgehend in allen Wandbereichen.

4.1.4 Einlassquellen

Für die Untersuchung der Simulations-Szenarien werden vier verschiedene Arten von Gefahrgutquellen verwendet: Eine Flächenquelle (Fq), eine Punktquelle (Pq), eine mittig angeordnete Spaltquelle (SqM) und eine stromabwärts angeordnete Spaltquelle (SqH). Die Einlassquellen bilden generisch Quellarten ab, wie sie in der Realität auftreten können. Fq stellt eine Einlassquelle über die Beladungsöffnung eines Frachtcontainers LD6 oder eine offene Anordnung von Behältern auf Palletten dar.

SqM repräsentiert eine Einlassquelle aus dem Bereich des Spaltes zwischen zwei Containern des Typs LD3. Pq bildet eine lokale, punktförmige Leckage oder ein Leck in der Außenwand eines ULD ab. SqH repräsentiert eine Gefahrstoffquelle im Bereich zwischen Beladungsöffnung und Außenwand eines ULD. Eine schematische Darstellung der Anordnung der Gefahrstoffquelle im Frachtraum zeigt Abbildung 4-4. Die Gefahrstoffquellen sind im ersten Spalt zwischen zentralem Container und dem ersten daneben angeordneten Container im Bereich der Ebene E-L positioniert. Mit Ausnahme von SqH sind die Quellen mittig, d.h. an der Stelle $X/B=0,5$ angeordnet. SqH ist bei $X/B=0,85$ positioniert.

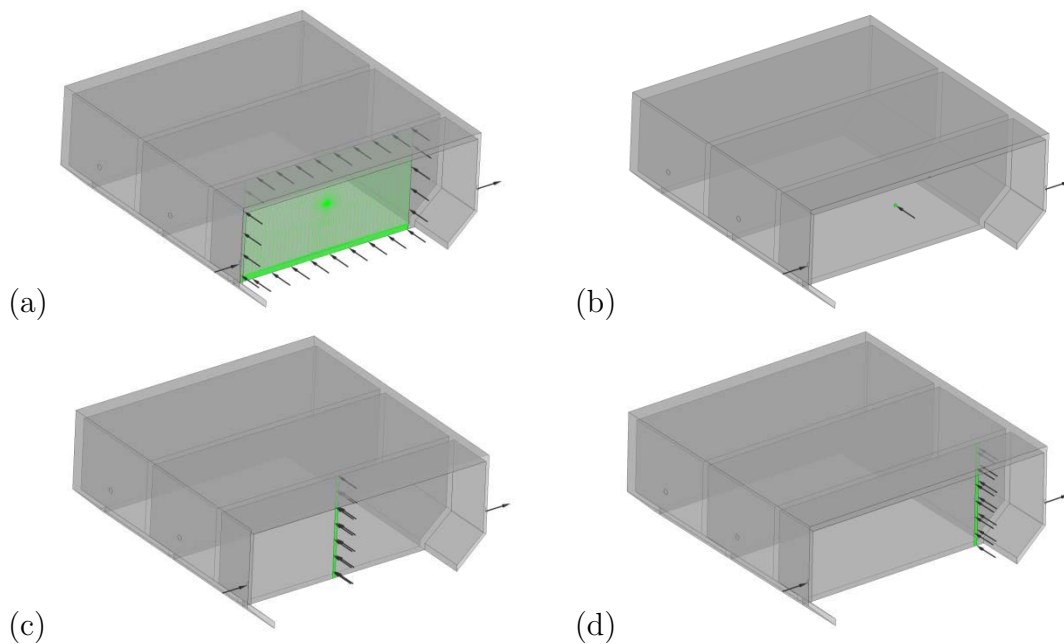


Abbildung 4-4: Positionen der verschiedenen Einlassquellentypen im Modellfrachtraum: Flächenquelle Fq (a), Punktquelle Pq (b), Spaltquelle Mitte SqM (c) und Spaltquelle Hinten SqH (d)

4.2 Bewertung des numerischen Modells

4.2.1 Gitterunabhängigkeit

Eine gute numerische Lösung ist nicht vom verwendeten Rechengitter abhängig. Die Bedeutung der Gitterunabhängigkeit im Rahmen der Verifikation und Validierung von numerischen Ergebnissen wird von Oberkampf [13] und Roache [115] aufgezeigt. Shyy [116], Celik [117] sowie Roache [118] geben weiterführende Informationen und Anwendungen der Thematik. Bei der Erzeugung eines Rechengitters ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der korrekten Auflösung von strömungsmechanischen Strukturen (feines Gitter) bei möglichst geringem Rechenaufwand (grobes Gitter). Nach diesen Anforderungen wird das Rechengitter bewertet und ausgewählt. Hierfür wird eine

Gitterstudie in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst werden der Einfluss der Randschichtdicken und anschließend der Einfluss der Rechengitterauflösung untersucht.

Einfluss der Randschichtdicke

Aufgrund der Wandhaftbedingung liegt in Wandnähe ein Gradient der Strömungsgeschwindigkeit vor. Für eine volle Auflösung der Grenzschicht und damit der Gradienten der Strömungsgrößen sind sehr feine Gitter notwendig. Um die Gitterauflösung in Wandnähe reduzieren zu können, sind in den in Ansys CFX® verwendeten Turbulenzmodellen Wandfunktionsmodelle implementiert. Diese Wandfunktionsmodelle basieren auf empirischen Ansätzen, um eine volle Auflösung der Grenzschichten zu umgehen. Dies bietet den Vorteil einer geringen notwendigen Anzahl von Gitterpunkten in Wandnähe, was zu deutlich reduzierten Rechenzeiten führt. Für eine korrekte Nutzung dieser Wandfunktionen wird $y^+ < 2$ empfohlen [33, 79]. In der Literatur werden darüber hinaus y^+ -Werte von < 1 empfohlen [119]. Diese Bedingung wird in der vorliegenden Arbeit für die gesamte Domain angestrebt. Aus diesem Grund wird mittels einer systematischen Untersuchung von insgesamt vier verschiedenen Randschichtauflösungen deren Einfluss auf die berechneten y^+ -Werte untersucht. Die untersuchten Einstellungen und Ergebnisse an den Positionen RS1 ... RS5 sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Untersuchte Gitterauflösung in Wandnähe und y^+ -Werte

Einstellung	Gitter 1	Gitter 2	Gitter 3	Gitter 4
H_{RS} / B	$1,2 \times 10^{-4}B$	$1,8 \times 10^{-4}B$	$2,4 \times 10^{-4}B$	$3,6 \times 10^{-4}B$
$y^+_{max} / RS1$	0,81	1,23	1,62	2,40
$y^+_{max} / RS2$	0,13	0,19	0,25	0,36
$y^+_{max} / RS3$	0,14	0,21	0,27	0,39
$y^+_{max} / RS4$	0,06	0,09	0,11	0,17
$y^+_{max} / RS5$	0,06	0,09	0,13	0,19

Die Positionen RS1 ... RS5 sind dabei die Projektionen der in Tabelle 3-5 dargestellten Messpositionen M1 ... M5 auf die nächstgelegene Wand. Die Koordinaten von RS1 ... RS5 ergeben sich aus Tabelle 4-2. Aus den in Tabelle 4-1 dargestellten Ergebnissen wird ersichtlich, dass eine Randschichtauflösung mit einer Elementhöhe von $3,6 \times 10^{-4}B$ ausreichend ist, um an fast allen Positionen den geforderten y^+ -Wert von < 1 zu erhalten. Daher wird für alle weiteren Simulationen in der vorliegenden Arbeit die Höhe der Randschicht auf $3,6 \times 10^{-4}B$ festgelegt. Ausgehend von der ersten Elementschicht wächst die Elementhöhe um den Faktor 1,2.

Tabelle 4-2: Koordinaten der Positionen RS1 ... RS5

Position	X / mm	Y / mm	Z / mm
RS1	0	0...100	0
RS2	10...390	+89	0
RS3	40	+89	-70...+70
RS4	210	+89	-70...+70
RS5	370	+89	-70...+70

Einfluss der Rechengitterauflösung

Ausgehend von einem Referenzrechengitter mit einer hohen Auflösung (R0) werden drei weitere Rechengitter (R1, R2, R3) erzeugt, die eine größere Gitterweite und damit eine geringere Auflösung aufweisen. Das Referenzgitter mit ca. $7,5 \times 10^6$ Knoten erzeugt einen numerischen Aufwand, der bei der zur Verfügung stehenden Rechenleistung zu nicht akzeptablen Rechenzeiten führt. Mit der schrittweisen Verringerung der Elementanzahl werden möglichst geringe Rechenzeiten angestrebt. Für die Bewertung der Rechengitter werden die numerischen Fehler ermittelt. Das Referenzgitter R0 stellt dabei jeweils die Referenzgröße dar, da eine exakte numerische Lösung nicht existiert.

Zur Ermittlung der numerischen Fehler werden drei verschiedene Fehlernormen verglichen, wie sie Marosevic vorschlägt [120]. Die Fehler werden als Differenz der mittleren Geschwindigkeit für das Rechengitter mit der jeweiligen Gitterauflösung und dem Referenzrechengitter für alle Knoten berechnet. Die verwendeten Fehlernormen sind der mittlere Fehler (L1), die Standardabweichung (L2) und der maximale Fehler (L_{\max}):

$$L1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [u_{i,k,Rx} - u_{i,k,R0}] \quad (4-1)$$

$$L2 = \frac{1}{N} [(u_{i,k,Rx} - u_{i,k,R0})^2]^{1/2} \quad (4-2)$$

$$L_{\max} = \max \|u_{i,k,Rx} - u_{i,k,R0}\| \quad (4-3)$$

Hierbei sind $u_{i,k,Rx}$ jeweils die mittlere Geschwindigkeit des betrachteten Rechengitters x am Knoten k und $u_{i,k,R0}$ die mittlere Geschwindigkeit des Rechengitters R0 am Knoten k. Wie erwartet gehen mit sinkender Auflösung des Rechengitters steigende Werte für alle betrachteten Fehlernormen einher, wie in Abbildung 4-5 ersichtlich ist. Deutlich wird dabei, dass sich alle Fehlernormen des Gitters R2 dem Gitter R1 approximieren, sodass der Mehrwert des feineren Gitters im Sinne einer numerischen Genauigkeit abnimmt.

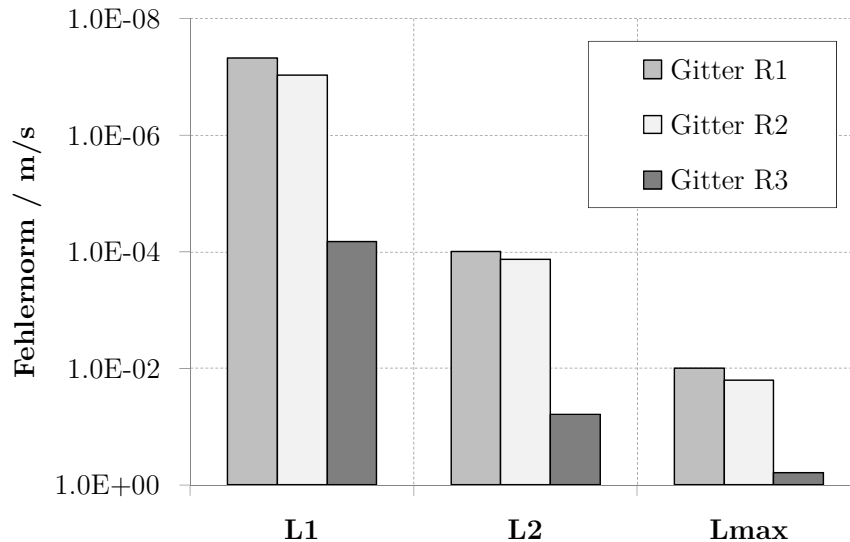


Abbildung 4-5: Fehlernormen L1, L2 und L_{max} für die Rechengitter R1, R2 und R3

Anhand von Abbildung 4-6 wird deutlich, dass der Rechenaufwand mit der Anzahl Knoten ansteigt. Dargestellt ist der Rechenaufwand der drei betrachteten Gitter in Abhängigkeit der Knotenanzahl. Aus Abbildung 4-5 ergibt sich, dass der Anstieg der Fehlernormen nichtlinear verläuft. Das Verhältnis von numerischer Genauigkeit und numerischem Aufwand wird für größere Gitter günstiger, die Grenzen geben aber die absoluten Werte der Fehlernormen vor. Insgesamt liegen die absoluten Werte für alle Fehlernormen nur bei den zwei größeren Gittern auf sehr geringem Niveau. Das Rechengitter R2 stellt dabei den besten Kompromiss zwischen Gittergröße und geringer numerischer Fehler dar, wie aus den vorangestellten Betrachtungen ersichtlich wird.

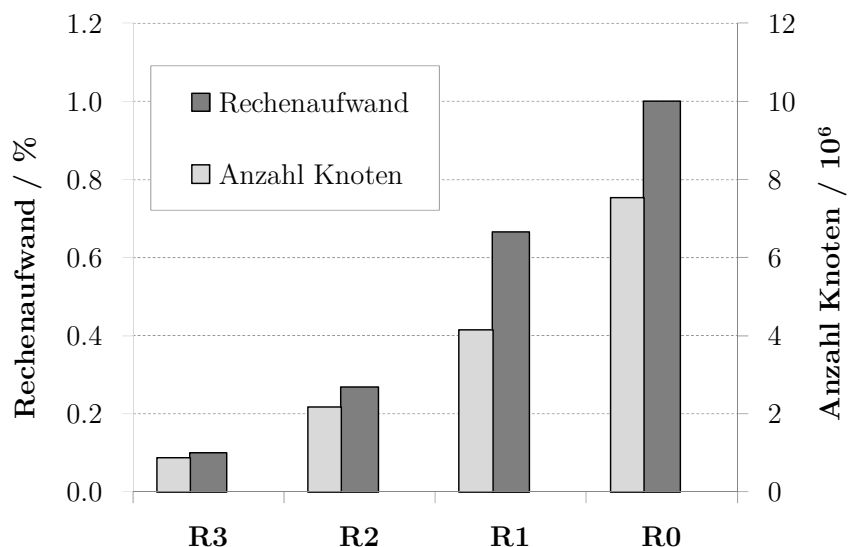


Abbildung 4-6: Rechenaufwand für die drei Rechengitter R1, R2 und R3

Die Ergebnisse der Berechnung der Fehlernormen sind nochmals in tabellarischer Form in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Übersicht der numerischen Fehler für die untersuchten Rechengitter

Bezeichnung	Gitter R0	Gitter R1	Gitter R2	Gitter R3
Knoten	7.525.696	4.148.610	2.174.805	878.058
Rechenaufwand	100 %	67 %	27 %	10 %
Fehlernorm L1	0.0E+00 m/s	4.7E-08 m/s	9.1E-08 m/s	6.6E-05 m/s
Fehlernorm L2	0.0E+00 m/s	9.9E-05 m/s	1.3E-04 m/s	6.2E-02 m/s
Fehlernorm Lmax	0.0E+00 m/s	9.9E-03 m/s	1.6E-02 m/s	6.2E-01 m/s

4.2.2 Turbulenzmodellierung

Ziel der Bewertung der Turbulenzmodellierung ist es, die vorausgewählten Turbulenzmodelle unter relevanten Bedingungen zu prüfen und untereinander zu vergleichen. Damit wird untersucht, welches der Modelle für den vorliegenden Fall die besten Voraussagen zulässt. Aus diesem Grund wird die Bewertung der Turbulenzmodellierung für den beschriebenen Belüftungsfall B1 durchgeführt. Dieser Fall stellt den Standard-Belüftungsfall des Frachtraums dar, sodass für diese Strömungsbedingungen ein Turbulenzmodell auszuwählen ist.

Die Bewertung der betrachteten Turbulenzmodelle wird anhand der Ergebnisse der CFD-Simulationen, die in Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 dargestellt sind, an den Positionen M1 bis M4 durchgeführt und jeweils mit den in Validierungsversuchen ermittelten LDA-Messdaten verglichen. Eine ausführliche Darstellung der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist Kapitel 5 zu entnehmen.

Ergebnisse Geschwindigkeiten

Zunächst werden die Ergebnisse der CFD-Simulationen mit den Verläufen der Geschwindigkeiten bewertet (siehe Abbildung 4-7). Die laminare Simulation ohne Turbulenzmodellierung zeigt insgesamt eine schlechte Übereinstimmung mit den LDA-Messdaten. Dies ist aufgrund der hohen Turbulenzgrade am Einlass und der daraus resultierenden Turbulenz im Frachtraum naheliegend und zeigt die Notwendigkeit auf, eine Turbulenzmodellierung zu verwenden. Das verwendete RNG-Modell liefert im Vergleich zu anderen betrachteten Turbulenzmodellen nur unzureichende Prognosen. Die Geschwindigkeiten werden in der CFD-Simulation im Vergleich zu LDA Messungen quantitativ unterschätzt. Der Verlauf ist im Vergleich zu den weiteren Modellen auch qualitativ schlechter. Die beste Übereinstimmung für das RNG-Modell ergibt sich an der Position M1 (siehe Abbildung 4-7 (a)), einem Bereich mit hohem Turbulenzgrad. Die geringste Übereinstimmung für das RNG-Modell ergibt sich an der Position M3 (siehe Abbildung 4-7 (c)) im Bereich des Ablösegebietes nach dem Eintritt der Strömung in den Spalt zwischen dem zentralen Container und dem ersten links davon angeordneten Container. Die hier vorliegenden großen Gradienten in der Geschwindigkeit sowie der Bereich des Rückströmgebietes werden weniger gut wiedergegeben.

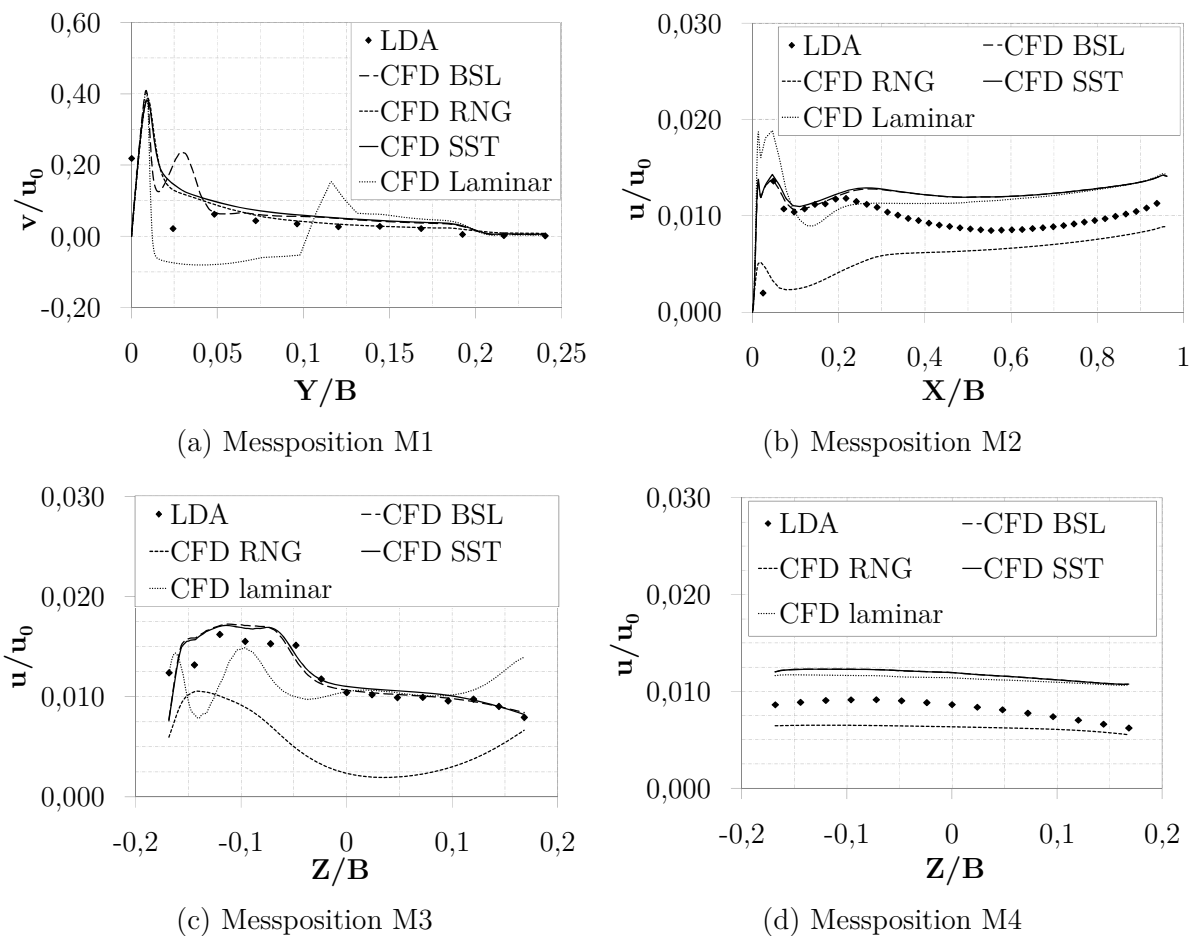


Abbildung 4-7: Geschwindigkeitsprofile der Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Turbulenzmodelle an den Messpositionen M1, M2, M3, und M4

Die beiden Modelle SST und BSL zeigen deutlich bessere Ergebnisse für alle betrachteten Positionen. Dies unterstreicht die Einsetzbarkeit der beiden Modelle für die Strömungsbereiche unterschiedlicher Charakteristika im Frachtraum. Die besten Ergebnisse werden an den Positionen M1 (siehe Abbildung 4-7 (a)) und M3 (siehe Abbildung 4-7 (c)) mit höheren Turbulenzgraden erzielt, die schlechtesten Ergebnisse zeigt Position M2 (siehe Abbildung 4-7 (b)), welche eine relativ turbulenzarme Region abbildet. Die Positionen M4 (siehe Abbildung 4-7 (d)) zeigt qualitativ eine recht gute Übereinstimmung mit den LDA-Daten, quantitativ wird die Geschwindigkeit jedoch etwas überschätzt.

Ergebnisse Schwankungsgeschwindigkeiten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der CFD-Simulationen mit den Verläufen der Schwankungsgeschwindigkeiten bewertet (siehe Abbildung 4-8). Auch für die Vorhersage der Schwankungsgeschwindigkeiten erzeugt das RNG-Modell im Vergleich mit dem SST-Modell und dem BSL-Modell deutlich schlechtere Ergebnisse, wie sich bereits zuvor im Vergleich der Geschwindigkeiten zeigte.

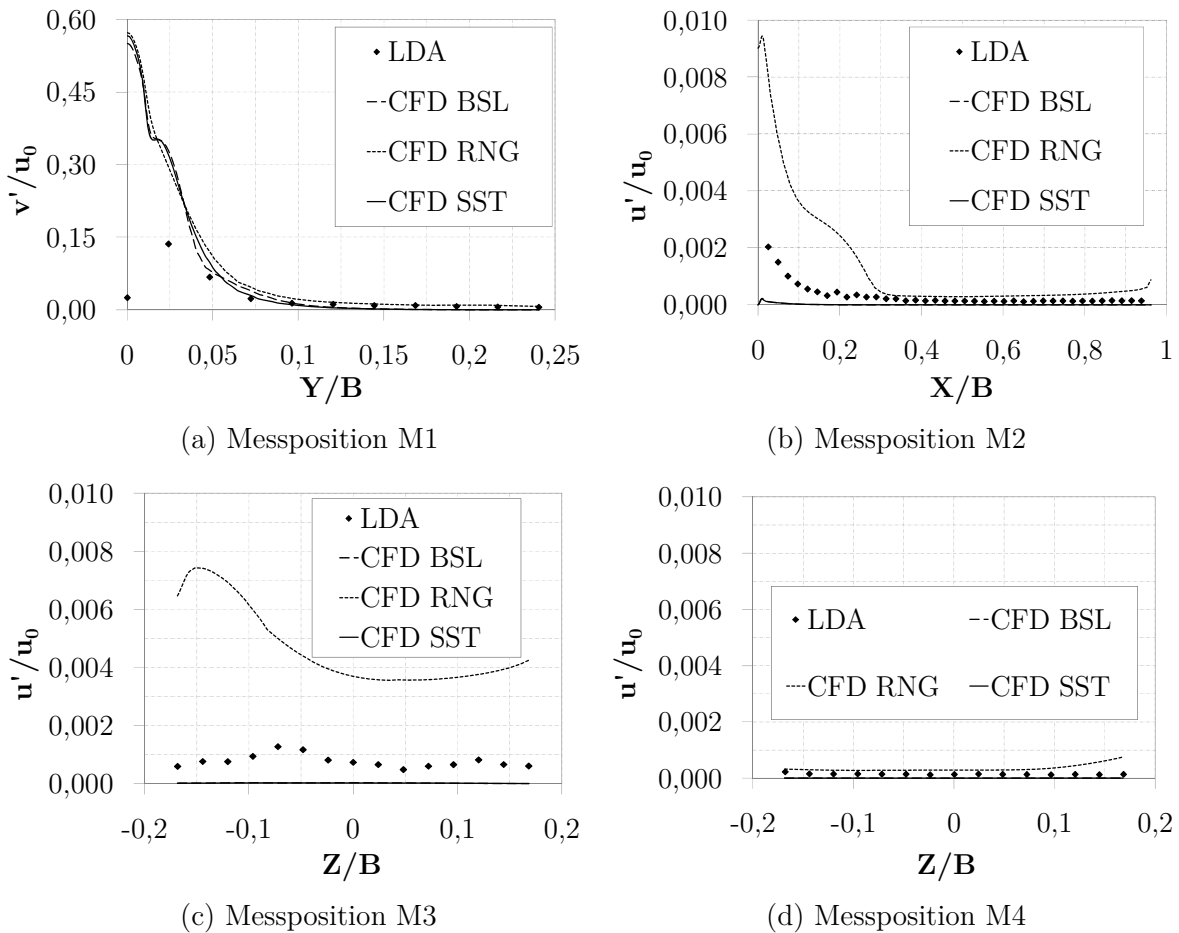


Abbildung 4-8: Profile der Schwankungsgeschwindigkeiten für verschiedene Turbulenzmodelle an den Messpositionen M1, M2, M3 und M4

Das SST-Modell und das BSL-Modell bilden die Schwankungsgeschwindigkeiten im Bereich mit höherer Turbulenz, Positionen M1 und M2 (siehe Abbildung 4-8 (a) Abbildung 4-8 (b)) besser ab. Auch für diese beiden Modelle ergeben sich quantitative Abweichungen, diese fallen aber relativ gering aus und betreffen insbesondere den Bereich $Y/B < 0,075$. In den Bereichen mit geringerem Turbulenzgrad, Position M4 (siehe Abbildung 4-8 (d)) ist die Übereinstimmung für alle betrachteten Modelle geringer. Quantitativ ergeben sich für das SST-Modell und das BSL-Modell vergleichsweise signifikant bessere Ergebnisse. In Abbildung 4-8 ist zu erkennen, dass die Werte der Schwankungsgeschwindigkeit an den Positionen M3 (siehe Abbildung 4-8 (c)) und M4 (siehe Abbildung 4-8 (d)) relativ niedrig sind und vorhandene Abweichungen der CFD-Daten zu den LDA-Daten daher absolut auf geringem Niveau liegen.

Bewertung

Für die Leistungsfähigkeit der einzelnen betrachteten Turbulenzmodelle kann folgendes festgestellt werden:

- Die Ergebnisse der vergleichenden CFD-Simulationen mit Turbulenzmodellierung zeigen insgesamt für die Bereiche mit geringerem Turbulenzgrad eine geringere Vorhersagequalität.
- Das auf dem Standard-k- ϵ -Modell basierende RNG-Modell ist insbesondere für die wandfernen Bereiche geeignet. Da die betrachtete beladene Frachtraumgeometrie entscheidend durch Wandbereiche geprägt ist, ist die Vorhersagequalität des RNG-Modells geringer.
- Das SST-Modell basiert auf dem Standard-k- ω -Modell und eignet sich sowohl für den wandnahen als auch den wandfernen Bereich. Das SST-Modell zeigte in der durchgeführten Turbulenzmodell-Studie gute Ergebnisse bei geringen Rechenzeiten.
- Die Verwendung des Reynolds-Spannungs-Modells BSL ist mit deutlich erhöhtem numerischem Rechenaufwand verbunden, da die zusätzlichen Gleichungen für die Reynolds-Spannungen zu lösen sind. Die Vorhersagequalität des Modells ist im vorliegenden Fall mit der des SST-Modells vergleichbar. Vor diesem Hintergrund ist der erhöhte Mehraufwand für die numerische Berechnung nicht sinnvoll.

4.3 Simulations-Szenarien

4.3.1 Modell-Szenarien

Die physikalische Dauer eines realen Transport-Szenarios ist in der vorliegenden Arbeit in CFD-Simulationen nicht darstellbar. Für typische Flugzeiten auf Langstrecken von 10 h ergeben sich bei Zeitschrittweiten im Bereich von $10^{-2} \dots 10^{-4}$ s mehrere Millionen Iterationen. Unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Rechenleistung ergeben sich daraus Rechenzeiten in der Größenordnung von mehreren Wochen bzw. Monaten für eine einzelne Simulation. Aus diesem Grund werden physikalisch verkürzte Modellszenarien verwendet.

Als Simulationsdauer werden 150 s definiert. Für die Modellszenarien werden die in Abschnitt 2.5.3 ermittelten resultierenden Massenstromraten verwendet. Aufgrund der verkürzten Transportdauer reduziert sich die Gesamtmasse des in den Frachtraum einströmenden Gefahrguts. Der Gaseinlassmassenstrom aufgrund von Permeation und Leckage ist eine zeitbezogene Größe. Die Auswirkung der Verkürzung der physikalischen Flugdauer unterscheidet sich für aktiv belüftete und nicht aktiv belüftete Frachträume:

- Für aktiv belüftete Frachträume (MS-1, MS-2) ist die Stoffausbreitung unter anderem vom Einlassmassenstromverhältnis α abhängig (siehe Abschnitt 6.3.1). Die Stoffausbreitung eines einströmenden Gefahrguts wird daher besonders vom Verhältnis der beiden zeitbezogenen Größen Luftmassenstrom und Gefahrgutmassenstrom beeinflusst und nicht von der Gesamtmasse des

einströmenden Gefahrguts während der Flugdauer dominiert. Aus diesem Grund ist die physikalische Verkürzung der Flugdauer für die Simulation eines Modellszenarios gerechtfertigt.

- Für nicht aktiv belüftete Frachträume (MS-3, MS-4) ist aufgrund der fehlenden B-RB das Einlassmassenstromverhältnis α nicht verfügbar. Hier spielt die Gesamtmasse eines einströmenden Gefahrguts eine Rolle. Aufgrund der Verkürzung der Flugdauer verringert sich auch die Gesamtmasse des Gefahrguts. Die aufgrund der verwendeten geringeren Gefahrgutmenge ermittelte Stoffausbreitung stellt aus sicherheitstechnischer Sicht eine konservative Betrachtungsweise dar, da bei längeren Flugszenarien größere absolute Gefahrgutmengen austreten. Ergeben sich für verkürzte Flugzeiten kritische Mengen an austretendem Gefahrgut, so ist dies für längere Flugzeiten umso mehr der Fall.

In Abschnitt 2.2.2 wird gezeigt, dass sich in Abhängigkeit der Flugphasen der Kabinendruck ändert. Die aufgrund von Permeation und Leckage entstehenden Gefahrgutmassenströme werden über den Umgebungsdruck in der Flugzeugkabine und den daraus resultierenden Druck im Gefahrgutbehälter beeinflusst. Es werden folgende Annahmen für die Modellszenarien zugrunde gelegt:

- Während der Steigphase sinkt der Druck in der Kabine ab. Der entstehende relative Überdruck im Gefahrgutbehälter führt zu einem Gefahrgutmassenstrom aus dem Gefahrgutbehälter heraus.
- Während der Flugphase gleichen sich der Kabinendruck und der Innendruck des Gefahrgutbehälters an, sodass ein nur durch Permeation getriebener resultierender Massenstrom entsteht.
- In der Sinkphase steigt der Kabinendruck auf das Druckniveau am Boden an. Der Innendruck des Gefahrgutbehälters ist geringer als der Umgebungsdruck, sodass der Gefahrgutbehälter zusammengedrückt wird. Aufgrund des geringen Innendrucks des Gefahrgutbehälters ist ein Leckagemassenstrom nicht gegeben.

Die für die Simulationen der Modellszenarien verwendete Frachtraumgeometrie entspricht dem in Abschnitt 3.2.2 dargestellten Modellfrachtraum im Maßstab 1/10. Die für die vier Szenarien MS-1 ... MS-4 verwendeten Randbedingungen werden in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, mit der Ausnahme der Einlassrandbedingung für die Szenarien MS-3 und MS-4. Da diese beiden Szenarien keine aktive Belüftung des Frachtraums aufweisen, ist eine Luft-Einlassrandbedingung (B-RB) nicht notwendig, sondern lediglich eine Gefahrgut-Einlassrandbedingung. Als numerisches Gitter wird das Gitter R3 verwendet. Die Simulation der Modellszenarien wird mittels transienter Simulationen durchgeführt. Es wird das Gefahrgut Toluol mit einem Einlassmassenstromverhältnis $\alpha=1000$ (Standard-Beladung) und die Einlassquelle Fq verwendet. Die verwendeten Eigenschaften der Modellszenarien sind in Tabelle 4-4

dargestellt. Die Leckagephase mit einem Gefahrgutmassenstrom beginnt für die Szenarien MS-1 und MS-3 nach 5 s Simulationszeit und endet nach 20 s Simulationszeit. Anschließend ist kein Gefahrgutmassenstrom bis zum Ende der Simulationszeit von 150 s gegeben. Für die Szenarien MS-2 und MS-4 beginnt die Leckagephase mit einem Gefahrgutmassenstrom nach 5 s Simulationszeit und endet nach 150 s mit dem Ende der Simulation.

Tabelle 4-4: Eigenschaften der verwendeten Modellszenarien

Szenario	Belüftungs- Einlass	Belüftungs- Auslass	Dauer Lufteinlass	Dauer Gefahrguteinlass
MS-1	ja	ja	150 s	15 s
MS-2	ja	ja	150 s	145 s
MS-3	nein	ja	0 s	15 s
MS-4	nein	ja	0 s	145 s

Der Umgebungsdruck in der Kabine wird für die verschiedenen Flugphasen bei 1 bar konstant gehalten. In Abbildung 4-9 ist schematisch der Verlauf der Gefahrgutmassenströme während der Flugphasen dargestellt.

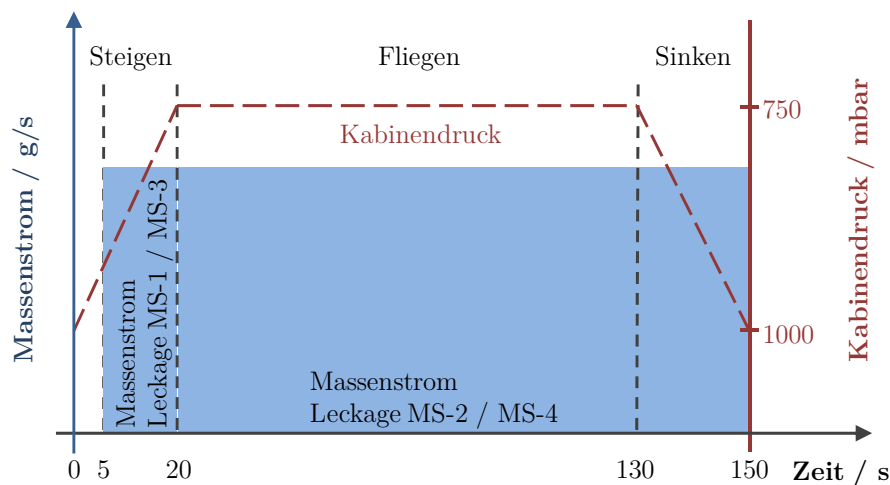


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Gefahrgutmassenstroms während der Flugphasen

4.3.2 Transport-Szenarien

Die Simulation von Transport-Szenarien im Originalmaßstab erfordert die Definition einer skalierten Frachtraumgeometrie. Als Basis hierfür wird der bisher verwendete Modellfrachtraum im Maßstab 1/10 verwendet und auf den Maßstab 1/1 skaliert. Es wird somit ein generischer Frachtraum verwendet, der in seinen Abmaßen und der Belüftungssituation gängigen Flugzeugmustern entspricht. Das freie Volumen der Frachtraumgeometrie im beladenen Zustand beträgt 9411 l. Die Abmessungen und alle

Längen des Frachtraums im Maßstab 1/1 entsprechen jenen in Abbildung 3-1, skaliert um den Faktor 10, und betragen ca. $8,4 \times 4,1 \times 1,7 \text{ m}^3$. Als numerisches Gitter wird das Gitter R3 verwendet, welches um den Faktor 10^3 skaliert wird, um den Maßstab 1/1 zu erreichen. Das Gitter besteht aus $1,02 \times 10^6$ Mio. Hexaeder-Elementen, die Randschichtdicke beträgt typischerweise $3,6 \times 10^{-4} \text{ B}$.

Für die Simulation im Originalmaßstab werden die Szenarien OS-1 und OS-3 verwendet, welche den auf den Maßstab 1/1 skalierten Szenarien MS-1 und MS-3 entsprechen (siehe Abschnitt 4.3.1 und Tabelle 4-4). Die Eigenschaften der Szenarien im Originalmaßstab sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Eigenschaften der verwendeten Transport-Szenarien im Originalmaßstab

Szenario	Belüftungs- einlass	Belüftungs- -auslass	Dauer Luft einlass	Dauer Gefahrguteinlass
OS-1	ja	ja	150s	15s
OS-3	nein	ja	0s	15s

Das Szenario OS-1 stellt einen realitätsnahen Transportfall dar, da der Gefahrgutmassenstrom zeitlich begrenzt ist und der Frachtraum über eine aktive Belüftung verfügt, wie dies in Langstreckenflugzeugen in der Regel der Fall ist (siehe Abschnitt 2.2.1). Die Simulationsdauer beträgt 150 s, wobei der Gefahrgutmassenstrom nach einer Simulationsdauer von 5 s beginnt und nach 20 s endet. Die Frachtraumbelüftung ist während der gesamten Simulationsdauer aktiv. Das Szenario OS-3 stellt den ungünstigeren Fall im Vergleich zu Szenario OS-1 dar, da keine aktive Frachtraumbelüftung vorhanden ist. Der Gefahrgutmassenstrom beginnt auch hier bei einer Simulationsdauer von 5 s und endet nach 20 s. Die Simulationen der Szenarien im Originalmaßstab werden mittels transienter Simulationen durchgeführt. Es wird das Gefahrgut Toluol mit einem Einlassmassenstromverhältnis $\alpha=1000$ (Standard-Beladung) und die Einlassquelle Fq verwendet.

4.3.3 Indikatoren

Die Bewertung des Stofftransports im Frachtraum anhand der vorgestellten Szenarien wird mittels folgender Größen als Indikatoren vorgenommen:

Normierte UZG-Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$

C_i ist die durchschnittliche volumetrisch gemittelte Konzentration des betrachteten Stoffes i im Frachtraum. $C_{i,UZG}$ ist jene Konzentration, für die die UZG des betrachteten Stoffes i erreicht wird. Für $C_i/C_{i,UZG} < 1$ wird die UZG im Frachtraum unterschritten, für $C_i/C_{i,UZG} = 1$ wird die UZG erreicht. $C_i/C_{i,UZG}$ ist einheitenlos.

Normierte Konzentration C_i/C_0

C_0 ist die durchschnittliche Konzentration am Auslass, gemittelt über den Auslassquerschnitt. Durch die Normierung von C_i mit C_0 bezieht sich die durchschnittliche Frachtraumkonzentration auf die jeweils spezifisch am Austritt vorliegende Konzentration. Der Quotient ist einheitenlos.

Massenanteil Y_i

Y_i ist der Massenanteil des jeweils betrachteten Stoffes i . Dieser wird in Prozent angegeben.

Einlassmassenstromverhältnis α

Das Verhältnis des Einlassmassenstroms von Gefahrgut zum Einlassmassenstrom von Luft in den Frachtraum wird definiert wie folgt:

$$\alpha = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_G} \quad (4-1)$$

Hierbei ist \dot{m}_G der Einlassmassenstrom des Gefahrguts und \dot{m}_L der Einlassmassenstrom der Luft.

4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Die Geometrie des numerischen Modells entspricht dem in Kapitel 3 vorgestellten Frachtraummodell im Maßstab 1/10.
- Als Einlassrandbedingung wird ein Einlassgeschwindigkeitsprofil mit Vorgabe von Turbulenzparametern, als Auslassrandbedingung wird ein Opening verwendet. Das Gefahrgut wird mittels eines Massenstroms mit Vorgabe von Turbulenz- und Richtungseigenschaften eingebracht. Eine glatte Wand mit Wandhaftbedingung stellt die Wandrandbedingung dar. Es wird eine Symmetriebedingung genutzt.
- Für die Untersuchungen am generischen Frachtraummodell wird ein hexastrukturiertes Gitter mit Ansys ICEM[®] generiert und der Gittereinfluss auf die Simulationsergebnisse untersucht.
- Das Gitter R2 erzeugt nur geringe numerische Fehler für die drei betrachteten Fehlernormen und wird für einkomponentige Simulationen verwendet. Für die Simulation mehrkomponentiger Strömungen ermöglicht das Gitter R3 deutlich reduzierte Rechenzeiten und wird daher für diesen Fall verwendet.
- Im Rahmen einer Turbulenzmodell-Studie werden das SST-Modell und das RNG-Modell als geeignete Turbulenzmodelle für den vorliegenden Fall ermittelt.

- Beide untersuchten Modelle zeigen sowohl für die Geschwindigkeiten als auch für die Schwankungsgeschwindigkeiten als Maß für die Turbulenz die beste qualitative und quantitative Übereinstimmung mit LDA-Daten. Aufgrund des geringeren Rechenaufwandes wird in dieser Arbeit das SST-Modell verwendet.
- Es werden vier Modell-Szenarien mit einer Simulationsdauer von 150 s definiert, die sich in der Frachtraumbelüftung (aktive Belüftung/keine aktive Belüftung) und der Dauer des Gefahrgutmassenstroms (5 ... 20 s / 5 ... 150 s) unterscheiden.
- Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Untersuchungen im Modellmaßstab werden zwei Transport-Szenarien im Originalmaßstab simuliert. Die Szenarien OS-1 und OS-3 basieren auf den zuvor verwendeten Szenarien MS-1 und MS-3, welche auf den Maßstab 1/1 skaliert werden.
- Die Bewertung des Stofftransports im Frachtraum anhand der vorgestellten Szenarien wird mittels definierter Indikatoren vorgenommen. Diese sind die mit der UZG normierte Konzentration, die mit der Auslasskonzentration normierte Konzentration, der Massenanteil und das Einlassmassenstromverhältnis.

5 Experimentelle Validierung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Modellversuche zur Validierung der numerischen Untersuchungen mittels CFD-Simulationen durchgeführt. Die dabei erzielten Versuchsergebnisse, eine Spektralanalyse der LDA-Messungen sowie eine Fehlerbetrachtung der Messungen sind Gegenstand dieses Kapitels.

5.1 Validierungsergebnisse

5.1.1 Validierung des Belüftungsfalles B1

Der Belüftungsfall B1 stellt ein realistisches Belüftungsszenario im Frachtraum dar. Eine globale Luftwechselrate von ca. 15,5 1/h wird üblicherweise im Frachtraum erreicht. Eine solche Luftwechselrate führt zu einer relativ geringen Reynoldszahl am Einlass von ca. 2.570. Die LDA-Messungen werden gemäß dem zuvor beschriebenen Messprogramm unter den beschriebenen Versuchsbedingungen durchgeführt.

Symmetrie

In Abbildung 5-1 ist die LDA-Messung jeweils für die Ebenen E-V und E-H dargestellt. Abbildung 5-2 zeigt die LDA-Messung der Ebenen E-L und E-R. Dargestellt ist die Geschwindigkeitskomponente v (m/s) für die Ebene E-V und E-H und die Geschwindigkeitskomponente u (m/s) für die Ebene E-L und E-R. Es wird deutlich, dass eine Symmetrie im Strömungsfeld besteht, was aufgrund der geometrischen Symmetrie des Frachtraumes zu erwarten ist. Der Vergleich der LDA-Messungen am Einlass (Ebene E-V) zeigt, dass der Strömung vom Einlass ausgehend eine Symmetrie aufgeprägt wird, welche sich im weiteren Verlauf stromabwärts auch in den Spalten zwischen dem zentral angeordneten Container und dem jeweils ersten Container links und rechts daneben aufrechterhält (Ebene E-R und E-L). Der Vergleich der Werte in den Spalten weist quantitative Unterschiede im Bereich der Einströmung in den Spalt auf, welche durch messtechnische Streuungen (Positioniergenauigkeit der Laseroptik) und Fertigungstoleranzen des Frachtraummodells begründet sind.

Qualitativ ist eine Symmetrie gut erkennbar. Diese ist durchgehend im Strömungsfeld vorhanden, was sich auch an den LDA-Messergebnissen am Auslass (Ebene E-H) zeigt. Das erste Validierungskriterium ist somit erfüllt.

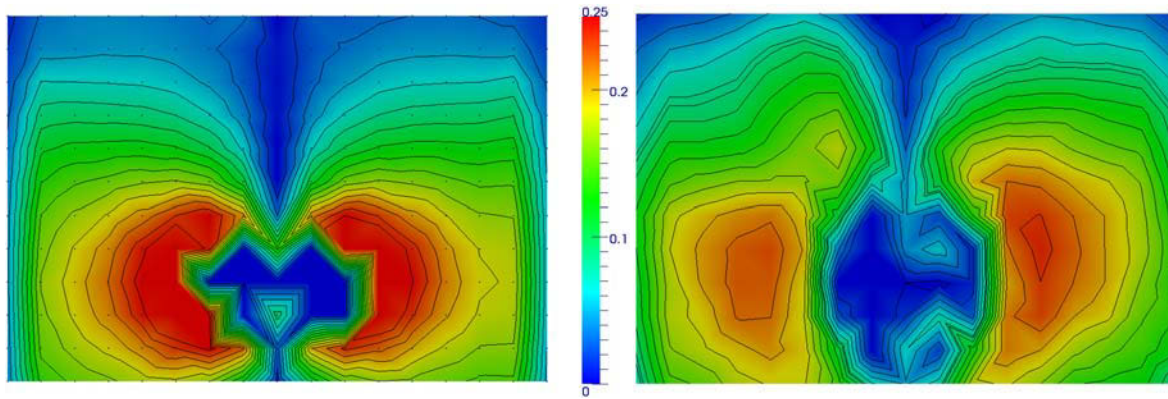


Abbildung 5-1: Vergleich von v (in m/s) für die Symmetriebedingung in der Ebene E-V (links) und in der Ebene E-H (rechts)

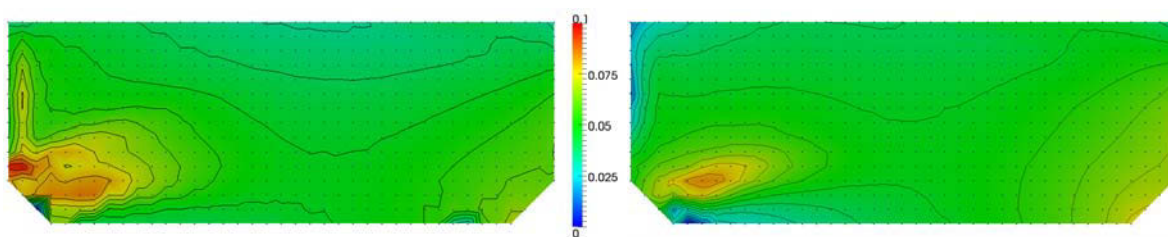


Abbildung 5-2: Vergleich von u (in m/s) für die Symmetriebedingung in der Ebene E-L (links) und in der Ebene E-R (rechts)

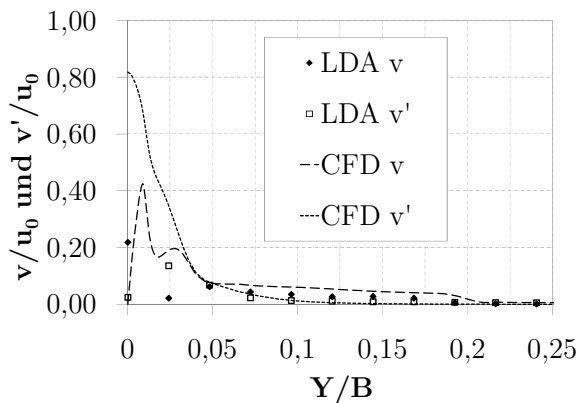
Geschwindigkeiten

In Abbildung 5-3 sind die Verläufe der Geschwindigkeiten und Schwankungsgeschwindigkeiten für die Messpositionen M1 bis M4 dargestellt. Abbildung 5-3 (a) zeigt die Messposition M1, welche auf der Höhe des Einlasses in positiver y -Richtung verläuft. Hier besteht ein großer Geschwindigkeitsgradient, da der Einlassstrahl auf den zentral angeordneten Container trifft und in den engen Spalt umgelenkt wird. Der Verlauf der Geschwindigkeit v wird qualitativ und quantitativ von der CFD-Simulation gut wiedergegeben. Im Bereich von $Y/B < 0,05$ ist die Qualität der Übereinstimmung etwas geringer. Die Schwankungsgeschwindigkeit v' wird ebenfalls gut durch die CFD-Simulation ermittelt. Die Übereinstimmung von LDA-Messung und CFD-Simulation ist insgesamt als gut zu bewerten.

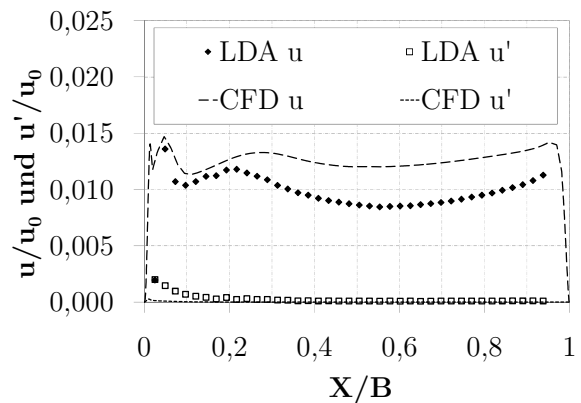
Abbildung 5-3 (b) zeigt die Messposition M2, welche horizontal in x -Richtung in der Mitte des Spalts zwischen dem zentralen Container und dem ersten in positiver y -Richtung daneben angeordneten Container auf der Höhe $Z=0$ über die ganze Breite des Frachtraums verläuft. Die Strömung wird ausgehend vom Einlass in den Spalt umgelenkt, sodass sich im vorderen Bereich von M2 bei $X/B < 0,1$ eine Beschleunigung im äußeren Bereich des Spalts und eine Rückströmzone im inneren Bereich des Spaltes ergibt. Qualitativ wird die Beschleunigungszone der Strömung durch die Berechnung sehr gut wiedergegeben, wie der Vergleich mit den LDA-Messwerten zeigt. Auch im weiteren Verlauf ist die qualitative Übereinstimmung gut, die CFD-Simulation

überschätzt die Geschwindigkeiten etwas, es ergeben sich Abweichungen in der Größenordnung $u/u_0 \approx 0,004$. Die Schwankungsgeschwindigkeit fällt hier im Spalt auf sehr geringe Werte nahe null. Im Bereich $X/B < 0,1$ wird die Schwankungsgeschwindigkeit durch die CFD-Simulation etwas zu niedrig berechnet.

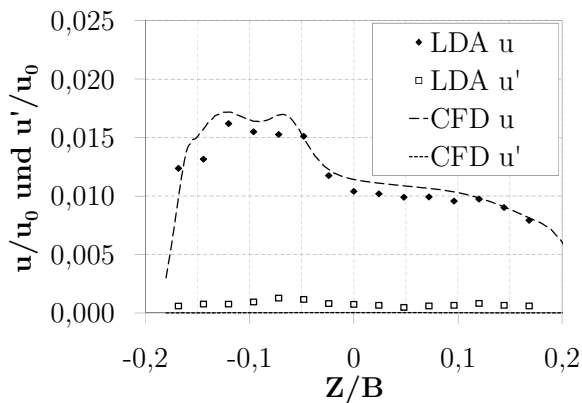
Die Verläufe von u und u' an der Messposition M3 sind in Abbildung 5-3 (c) dargestellt. M3 verläuft vertikal (z-Richtung) im vorderen Bereich des Spaltes zwischen dem zentralen Container und dem ersten in positiver y-Richtung daneben angeordneten Container an der Position $X/B=0,1$. Diese Zone ist im unteren Bereich von $Z/B < 0$ von höheren Geschwindigkeiten und Schwankungsgeschwindigkeiten geprägt, die mit steigender Höhe abnehmen. Die Übereinstimmung der Berechnung mit der LDA-Messung für u ist über den gesamten Verlauf von M3 qualitativ und quantitativ sehr gut. Die Schwankungsgeschwindigkeit bewegt sich auf geringem Niveau.



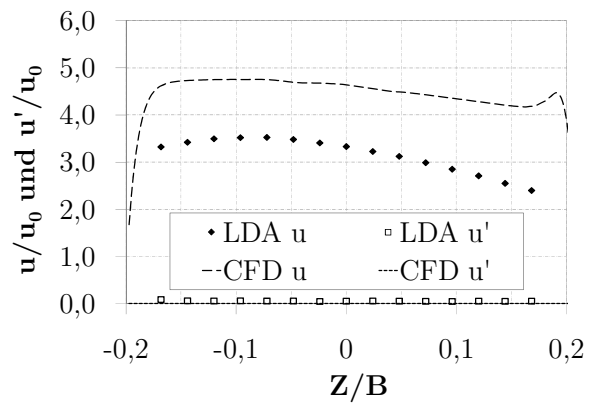
(a) Messposition M1



(b) Messposition M2



(c) Messposition M3



(d) Messposition M4

Abbildung 5-3: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile aus LDA-Messungen und CFD-Simulationen an den Messpositionen M1, M2, M3 und M4 für en Belüftungsfall B1

Die Messposition M4 ist in Abbildung 5-3 (d) dargestellt. Die Position verläuft parallel zu M3 an der Stelle $X/B=0,5$ weiter stromabwärts im Spalt. Die Strömung ist hier gering turbulent und von kleinen Geschwindigkeitsgradienten geprägt. Die

Schwankungsgeschwindigkeit liegt bei sehr niedrigen Werten. Der mittels der LDA-Messung bestimmte Verlauf von u' wird durch die CFD-Berechnung qualitativ und quantitativ gut wiedergegeben. Die Geschwindigkeit u wird qualitativ durch die numerische Berechnung gut approximiert, insgesamt ist der Betrag der Geschwindigkeit allerdings etwas zu hoch, was sich bereits an den zuvor beschriebenen Positionen zeigte.

Insgesamt zeigt der Vergleich der LDA-Messungen und CFD-Simulationen für die Geschwindigkeiten und die Schwankungsgeschwindigkeiten im Belüftungsfall B1 gute Übereinstimmungen. Qualitative Verläufe werden insgesamt gut wiedergegeben. Auch quantitativ liegen die betrachteten Größen sowohl in der richtigen Größenordnung als auch betragsmäßig nahe an den gemessenen Werten. Gewisse Abweichungen sind sichtbar. Diese sind für turbulente Bereiche der Strömung auf messtechnische Streuungen zurückzuführen, bzw. liegen in gering turbulenten Bereichen in durch die Turbulenzmodellierung des CFD-Modells zu gering abgeschätzten Beträgen der Schwankungsgeschwindigkeiten. Dies stellt eine Unzulänglichkeit der numerischen Berechnungen dar.

5.1.2 Validierung des Belüftungsfall B2

Der Fall B2 zeichnet sich durch eine hohe globale Luftwechselrate aus. Der Belüftungsfall B2 dient der Untersuchung des Einflusses der Einlassreynoldszahl auf die Strömung, vergleiche auch Abschnitt 3.2.1 und 6.1.1. Hierfür wird die Belüftung mit einer höheren Einlassreynoldszahl von 10.280 betrieben. Auch im Fall B2 werden die beschriebenen Versuchsbedingungen und das bereits vorgestellte numerische Modell verwendet. In Abbildung 5-4 sind die Verläufe der Geschwindigkeiten und der Schwankungsgeschwindigkeiten für die Messpositionen M1 bis M4 im Belüftungsfall B2 dargestellt.

In Abbildung 5-4 (a) ist die Messposition M1 dargestellt. Die mittels CFD-Simulation berechnete Geschwindigkeit v stimmt qualitativ sowie quantitativ relativ gut mit den experimentellen Werten überein. Für den Bereich $Y/B < 0,075$ sind aufgrund einer geringen Signalrate keine LDA-Messwerte ermittelbar. Die Übereinstimmung der Schwankungsgeschwindigkeit v' ist für den Bereich $Y/B > 0,075$ hinreichend genau. Insgesamt ist die Übereinstimmung der LDA-Messungen mit CFD-Simulationen an der Position M1 auch für den Belüftungsfall B2 als gut zu bezeichnen.

In Abbildung 5-3 (b) sind u und u' für die Messposition M2 dargestellt. Die CFD-Berechnung kann den Verlauf der Geschwindigkeiten für den Bereich $X/B < 0,4$ gut reproduzieren. Im Bereich $X/B > 0,4$ ist die Übereinstimmung geringer. Es ergeben sich mit steigender x-Koordinate wachsende Differenzen, da die CFD-Simulation die Geschwindigkeit zu hoch berechnet. Es ergibt sich eine maximale Abweichung von ca.

$u/u_0 \approx 0,007$. Insgesamt ist eine qualitativ zufriedenstellende Übereinstimmung gegeben. Für die Schwankungsgeschwindigkeit werden die Werte mittels der CFD-Simulation wie bereits zuvor im Fall B1 geringfügig zu niedrig berechnet.

Die in Abbildung 5-3 (c) dargestellten Verläufe der mit CFD-Simulationen berechneten Werte für u und u' an der Messposition M3 zeigen eine qualitativ ausreichende Wiedergabe der LDA-Messwerte. Die absoluten Abweichungen sind im Vergleich zum Fall B1 etwas größer und liegen hier durchschnittlich im Bereich von ca. $u/u_0 \approx 0,007$ bzw. $u'/u_0 \approx 0,002$.

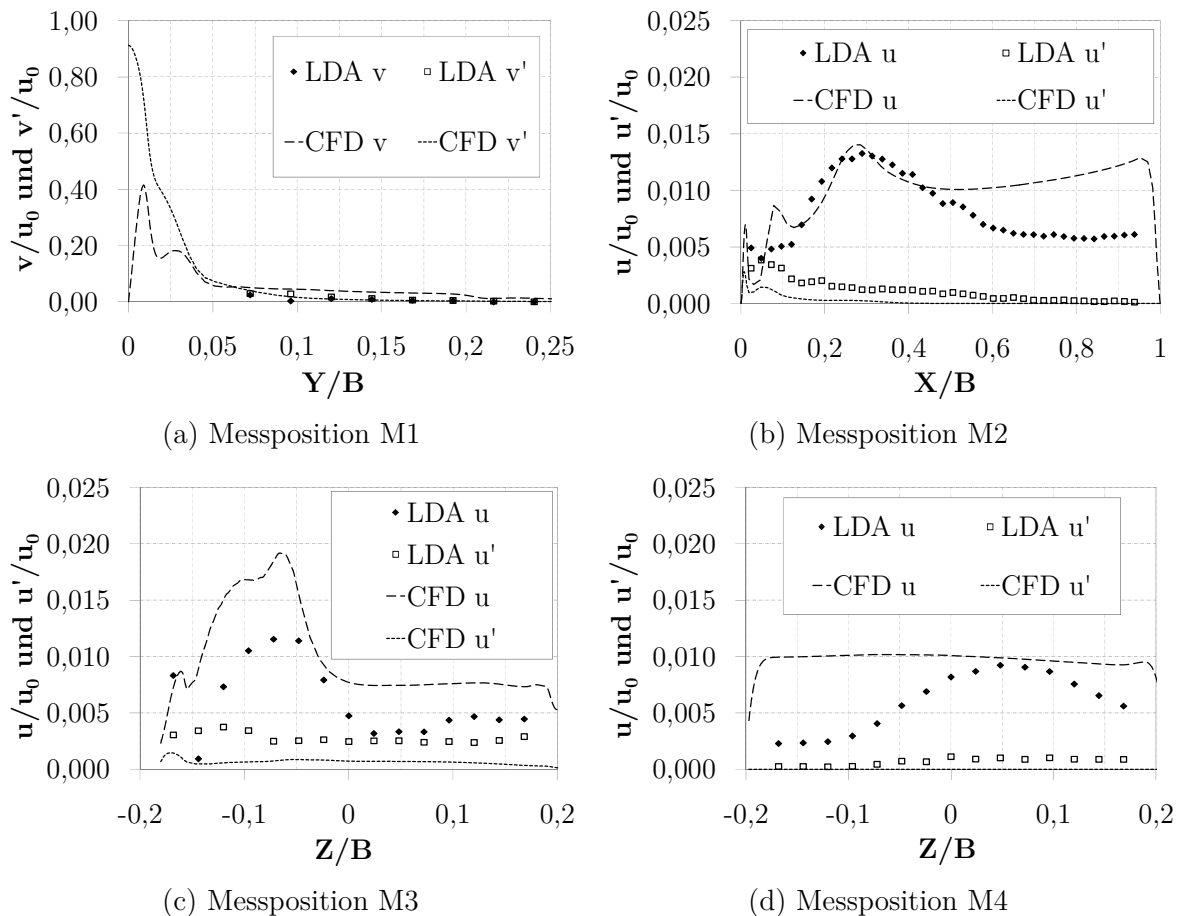


Abbildung 5-4: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile aus LDA-Messungen und CFD-Simulationen an den Messpositionen M1, M2, M3 und M4 für den Belüftungsfall B2

In Abbildung 5-3 (d) ist die Messposition M4 dargestellt. Für die Position M4 wird die Geschwindigkeit im Bereich $Z/B \approx 0,05$ relativ gut berechnet. In diesem Bereich sind die Beträge der Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Geschwindigkeit sehr klein und wachsen ausgehend davon an, wobei der Bereich positiver Koordinaten besser ermittelt wird. Die Schwankungsgeschwindigkeit nimmt geringe Werte nahe null an, die von der CFD-Simulation qualitativ und quantitativ gut ermittelt wird.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des Validierungsvergleichs im Belüftungsfall B2 ein ähnliches Bild zum Fall B1, jedoch mit quantitativ etwas höheren Abweichungen. Die Geschwindigkeiten und Schwankungsgeschwindigkeiten werden mittels CFD-Simulationen qualitativ zufriedenstellend wiedergegeben und die berechneten Größen weisen vergleichbare Beträge zu den LDA-Messungen ermittelten Werten auf. Die Übereinstimmung der Verläufe und die Beträge der betrachteten Größen für die am Einlass wesentlich höheren Reynoldszahlen sind zufriedenstellend.

5.1.3 Bewertung der Validierungsergebnisse

Die LDA-Messungen werden an zwei Betriebspunkten durchgeführt, bei Fall B1 und bei Fall B2. Als Vergleichsgrößen werden die Komponenten u und v des Geschwindigkeitsvektors \vec{U} sowie dessen Schwankungskomponenten u' und v' betrachtet. Die verwendeten Messpositionen decken einen großen Bereich der Frachtraumgeometrie zwischen Einlass und Auslass ab und erlauben somit einen Vergleich der LDA-Messungen mit CFD-Simulationen an verschiedenen Orten im Frachtraum.

Die LDA-Messungen zeigen eine Symmetrie des Strömungsfeldes zur Mittelachse der Geometrie. Diese Tatsache wird durch die CFD-Simulationen vorhergesagt, sodass das erste Validierungskriterium (Symmetrie) erfüllt ist. Daraus resultiert, dass die CFD-Simulationen auf die Untersuchung einer Hälfte der Geometrie reduziert werden können.

Für den Fall B1 zeigt der Vergleich der LDA-Messungen mit CFD-Simulationen insgesamt eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung. Es ergibt sich eine für die vorliegende Anforderung qualitativ richtige und konservativ orientierte Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment bei ausreichender Genauigkeit.

Für den Fall B2 zeigt sich ein mit dem Fall B1 vergleichbares Ergebnis. Die CFD-Simulationen zeigen Geschwindigkeiten und Schwankungsgeschwindigkeiten, die qualitativ gut die LDA-Messwerte wiedergeben. Quantitativ sind die Abweichungen etwas höher als im Fall B1. Die Übereinstimmung der Verläufe und Beträge der betrachteten Größen ist zufriedenstellend und für die vorliegenden Anforderungen ausreichend. Die größten Abweichungen ergeben sich in gering turbulenten Bereichen. Die Turbulenzmodellierung des CFD-Modells (vergleiche Abschnitt 3.1.2) schätzt in diesen Bereichen die Turbulenz etwas zu gering ab. Das zweite Validierungskriterium, die Übereinstimmung der Verläufe und Beträge der betrachteten Größen, ist somit ebenfalls als erfüllt zu bewerten.

Die Versuchsergebnisse lassen folgende Interpretation zu:

- Die Strömung wird maßgeblich von den engen Spalten im Container beeinflusst, was sich auf die Strömungsgeschwindigkeit und den Turbulenzgrad auswirkt. Beide Größen fallen ausgehend vom Einlass stark ab.
- Der Impuls der Einlassströmung hat nur einen geringen Einfluss auf das Strömungsfeld in den Spalten zwischen den Containern. Bei einer weiteren Erhöhung des Einlassimpulses ist kein wesentlicher Einfluss auf die Reynoldszahl im Bereich der Spalte zu erwarten.
- Die durchgeführten Modellversuche sind methodisch für die Validierung der durchzuführenden CFD-Simulationen geeignet. Das verwendete numerische Modell liefert qualitativ insgesamt gute, in einigen Bereichen zufriedenstellende Ergebnisse im Vergleich mit experimentellen Daten.

5.2 Spektralanalyse

Als drittes Validierungskriterium wird eine Spektralanalyse der LDA-Messdaten durchgeführt. Es wurden insgesamt acht Messpunkte im Bereich des Einlasses und im Bereich des Auslasses betrachtet. Die Koordinaten der Messpunkte sind in Anhang A.2 aufgeführt. Die Theorie zur Spektralanalyse von LDA-Daten wird von zahlreichen Autoren erläutert. Eine Übersicht zur Thematik gibt beispielsweise Benedict und Tummers [121, 122]. Das Vorgehen zur Spektralanalyse von LDA-Daten wird in drei Schritten durchgeführt. Zunächst wird für je einen Messpunkt der LDA-Datensatz mittels des Sample-and-Hold-Verfahrens rekonstruiert, um einen Datensatz mit äquidistanter Verteilung zu erhalten. Aufgrund der intermittierend aufgenommenen LDA-Signale ist eine Fast-Fourier-Transform-Analyse (FFT) ohne vorherige Datenrekonstruktion nicht möglich, da die FFT äquidistant verteilte Daten voraussetzt. Zur Daten-Rekonstruktion stehen verschiedene Verfahren unterschiedlicher Qualität zur Verfügung, der limitierende Faktor ist hierbei die Datenrate. Für eine ausreichend hohe Datenrate ist das in dieser Arbeit verwendete Sample-and-Hold-Interpolationsverfahren nullter Ordnung gut geeignet [123]. Anschließend an die Datenrekonstruktion wird eine FFT durchgeführt, bevor diese zuletzt in Form einer Power Spectral Density (PSD) bewertet werden. Da hier Geschwindigkeiten betrachtet werden, nimmt die PSD die Einheit m^2/s an. Die Bewertung der Daten in Form einer spektralen Leistungsdichte kann als Frequenzverteilung der turbulenten Energie der Strömung aufgefasst werden. Wiederkehrende Strömungsstrukturen erzeugen Maxima an Frequenzen, die den Frequenzen der betrachteten Strömungsstrukturen entsprechen.

In Abbildung 5-5 ist die spektrale Leistungsdichte für die LDA-Messungen an den Positionen S2 und S8 dargestellt. Es sind keine dominierenden Frequenzen zu erkennen,

die auf vorliegende periodische Strukturen in der Strömung hinweisen, da keine Frequenzen mit lokalen Maxima im Frequenzverlauf auftreten.

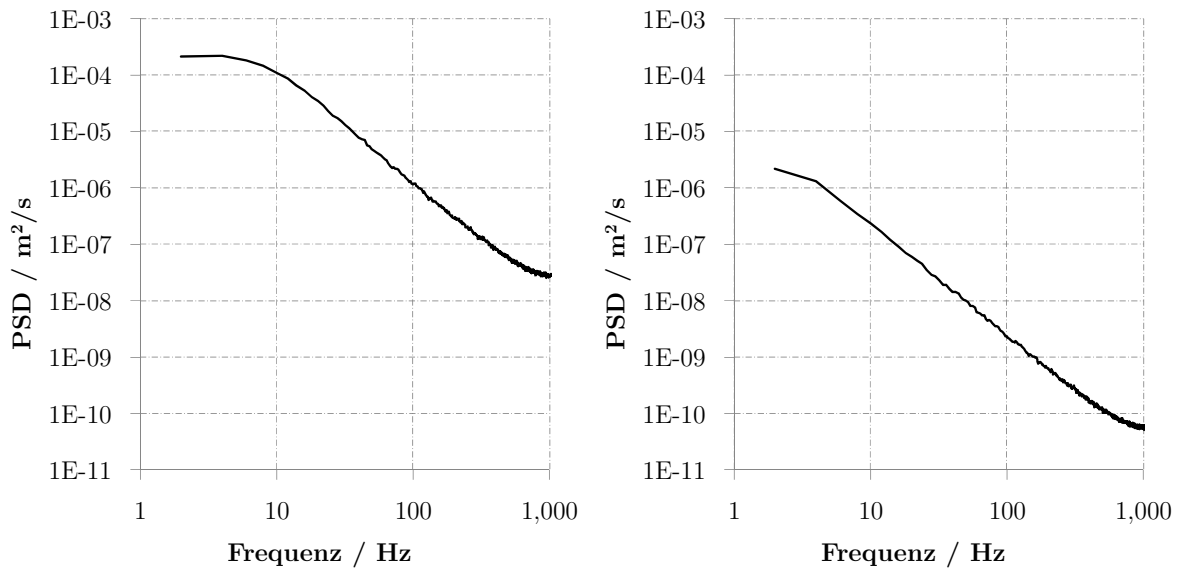


Abbildung 5-5: Leistungsdichtespektrum der LDA-Messdaten an den Positionen S2 (links) und S8 (rechts)

5.3 Fehlerbetrachtungen

5.3.1 Fehlerquellen bei LDA-Messungen

Das LDA-Messverfahren ist ein sehr exaktes Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten. Wie bei allen Messverfahren treten auch hier Messfehler auf. Diese werden im Folgenden erläutert und quantifiziert.

Signal Broadening

Signal Broadening entsteht, wenn sich die Geschwindigkeiten von Seeding-Partikeln während ihres Aufenthalts im Messvolumen der Laserstrahlen entweder zeitlich oder räumlich stark verändern. Starkes Beschleunigen oder Abbremsen von Tracer-Teilchen innerhalb einer kurzen Zeitspanne aufgrund von auftretender Turbulenz führt zu einer scheinbar erhöhten Turbulenz aufgrund einer künstlichen Verbreiterung der Geschwindigkeits-Dichte-Funktion [98]. Die durchschnittlich auftretenden Geschwindigkeiten betragen weniger als 1 m/s . Bei einer Messvolumenlänge $\Delta z_{LDA} = 0,399 \text{ mm}$ (siehe Tabelle 3-3) ergibt sich eine mittlere Verweildauer der Partikel von ca. $4 \times 10^{-4} \text{ s}$. Von einer relevanten Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten in einem so kurzen Zeitraum wird nicht ausgegangen, sodass diese Fehlerquelle nicht berücksichtigt wird. Treten räumliche Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit auf, so kann dies ebenfalls zum Signal Broadening führen. In den Spalten zwischen den

Containern treten über eine Breite $B_{Spalt}=6$ mm maximale Geschwindigkeitsänderungen von 6 m/s auf. Dadurch entstehen Gradienten von $\Delta u/B_{Spalt}=1$ m/s pro mm. Mit der Messvolumenbreite $\Delta x_{LDA}=0,047$ mm (siehe Tabelle 3-3) ergibt sich die mittels LDA gemessene Geschwindigkeit nach Ruck [98] zu $\pm 0,023$ m/s, was bezogen auf die auftretenden Geschwindigkeiten zu einem Fehler von ca. 0,4 % führen kann.

Teilchenfolgevermögen

Öltröpfchen mit einem Teilchendurchmesser von 1 ... 2 Mikrometer können in turbulenten Luftströmungen noch Fluidschwankungen von 5 ... 10 kHz folgen [98]. Die in dieser Arbeit verwendeten DEHS-Partikel sind mit einer mittleren Partikelgröße von 0,2 Mikrometer damit gut für turbulente Luftströmungen einsetzbar.

Biasing

Biasing entsteht bei LDA-Messungen aufgrund einer einseitigen Gewichtung bei der Mittelwertbildung einzelner Messereignisse (Bursts). Da bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten die Strömung mit mehr Partikeln beladen ist, als dies bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten der Fall ist, werden bei der Mittelung aller einzelnen aufgenommenen Messereignisse größere Strömungsgeschwindigkeiten überrepräsentiert, da mehr Partikel zu mehr Messereignissen führen. Der Fehler durch Biasing ist Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen, insgesamt wird der Fehler als gering bewertet bzw. ist bei Verwendung eines periodischen Samplings nicht vorhanden [124]. Dieser Fehler wird daher nicht weiter berücksichtigt.

Positionierung

Messfehler können bei LDA-Messungen aufgrund einer nicht exakten Positionierung der Laseroptik am gewünschten Messort entstehen. Der dadurch erzeugte Fehler ist insbesondere für große Geschwindigkeitsgradienten über kleine räumliche Distanzen relevant und ähnelt damit dem Signal Broadening aufgrund räumlicher Geschwindigkeitsgradienten. Die Fehlergröße wird durch eine exakte Justierung der Optik und durch die Wiederholgenauigkeit der Traverse bestimmt. Mit einer maximalen Geschwindigkeitsänderung von ca. 3 m/s bei einer Spaltbreite $s=6$ mm und einem Gradienten von $\Delta u/s=0,5$ m/s mm ergibt sich bei einer Positioniergenauigkeit $\Delta x_{Traverse}=0,1$ mm je Messpunkt (siehe Tabelle 3-2) eine maximale Geschwindigkeitsabweichung von $\pm 0,05$ m/s bzw. ein daraus resultierender Fehler von 1,66 %. LDA-Messungen mit automatisierter Traversierung können die Addition von Positionierfehlern hervorrufen. Um eine Fehlerfortpflanzung auszuschließen, wird bei LDA-Messungen nach maximal 20 Messpunkten eine Kalibrierung der Traverse durch eine manuelle Positionierung auf die Null-Position vorgenommen.

Insgesamt ist festzustellen, dass das LDA-Verfahren eine sehr exakte Messmethode zur Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten darstellt und die genannten Fehlerquellen den ungünstigsten Fall bei den durchgeführten LDA-Messungen darstellen.

5.3.2 Fehlerquellen bei Volumenstrommessungen

Das verwendete thermische Volumenstrom-Messverfahren kann zu einem beträchtlichen Fehler bei der Bestimmung des Einlassvolumenstroms führen. Der absolute Messfehler ist für die durchgeführten Validierungsbetrachtungen allerdings nicht relevant, da die Volumenstrommessung nicht zur Systemregelung verwendet wird. Vielmehr soll der Volumenstrom und damit die Luftwechselrate in einem für die Realität relevanten Bereich liegen. Dies wird mit dem verwendeten Verfahren erreicht. Um für die Validierung von CFD-Simulationen vergleichbare Randbedingungen sicherzustellen, wird die für die Einlassrandbedingung erforderliche Strömungsgeschwindigkeit am Einlass durch LDA-Messung ermittelt. Relevant ist daher nicht der absolute Fehler, sondern vielmehr die Wiederholgenauigkeit. Diese liegt bei 0,8 % der Messspanne. Um den Fehler der Wiederholgenauigkeit zu minimieren, werden die Messungen bei einer definierten Öffnungsposition des Druckluftventils durchgeführt, welche zwischen einzelnen Messungen nicht verändert wird.

Neben dem Messfehler des Volumenstromsensors entsteht ein Fehler aufgrund des zusätzlichen Volumenstroms von Seeding-Partikeln, der vom Messgerät nicht erfasst wird, da diese erst nach dem Messgerät zugeführt werden. Die Volumenstrommessung muss ohne Seeding-Partikel erfolgen, da der thermische Volumenstromsensor nur für die Messung von trockenen Volumenströmen geeignet ist. Dieser zusätzliche Fehler in der Bestimmung des Volumenstroms beträgt 0,0042 %.

5.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Im Rahmen des durchgeführten Messprogramms werden zwei Belüftungsfälle (B1 und B2) betrachtet. Die beiden Fälle unterscheiden sich in ihren Einlassmassenströmen, d.h. durch die effektiven Luftwechselraten.
- Die LDA-Messungen zeigen, dass das erste Symmetriekriterium erfüllt wird.
- Die LDA-Messungen zeigen für den Fall B1 eine insgesamt gute qualitative und quantitative Übereinstimmung der Validierungsgrößen. Auch für den Fall B2 zeigt sich eine insgesamt zufriedenstellende qualitative und quantitative Übereinstimmung der Validierungsgrößen. Die größten Abweichungen ergeben sich in gering turbulenten Bereichen aufgrund der Turbulenzmodellierung. Das zweite Validierungskriterium ist ebenfalls erfüllt.
- Eine Spektralanalyse der LDA-Daten ergibt keine dominierenden Frequenzen, welche auf vorliegende periodische Strukturen in der Strömung hinweisen würden. Das dritte Validierungskriterium ist somit ebenfalls erfüllt.

- Eine Fehlerbetrachtung zeigt mögliche Fehlerquellen bei der Messung von Strömungsgeschwindigkeiten mittels des LDA-Verfahrens auf. Die Diskussion und Quantifizierung der Fehlerquellen ergibt einen geringen rechnerischen Messfehler im Bereich von 1 ... 2 %. Der Messfehler bei der Ermittlung des Einlassvolumenstroms ist vernachlässigbar klein.

6 Untersuchung relevanter Einflussgrößen

Die zu untersuchenden Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Frachtraum werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Gegenstand dieses Kapitels ist eine systematische Untersuchung und Bewertung der Einflussgrößen, welche für das Strömungsfeld und den Stofftransport einen zentralen Einfluss haben. Ziel ist es dabei, den Einfluss einzelner Einflussgrößen isoliert zu betrachten und zu quantifizieren. Zunächst werden hierfür der Einlass- und der Wandeinfluss auf das Strömungsfeld und den Stofftransport untersucht. Anschließend werden verschiedene Konfigurationen und deren Einfluss auf den Stofftransport im Frachtraum untersucht und bewertet.

6.1 Einfluss der Einlass-Randbedingung

Die korrekte Beschreibung der Einlassrandbedingung ist für die Simulation von Innenraumströmung von großer Bedeutung. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass das Einlassgeschwindigkeitsprofil, die Einlassgeometrie und die Einlassposition einen großen Einfluss auf das Strömungsfeld und den Stofftransport haben [106, 125, 126, 127, 128]. Darüber hinaus sind weitere Parameter am Einlass von Interesse. Im Folgenden werden aus diesem Grund der Einfluss der Einlassreynoldszahl und der Einlassturbulenz (Turbulenzgrad) auf das Strömungsfeld und den Stofftransport im Frachtraum mittels stationärer Simulationen untersucht.

6.1.1 Einfluss der Einlassreynoldszahl

Einfluss der Einlassreynoldszahl auf das Strömungsfeld

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Müllejans [94] und Nielsen [97] belegen die Ähnlichkeit von Strömungen unterschiedlicher Reynoldszahlen in Modellversuchen. Müllejans zeigt, dass für isotherme Raumluchtströmungen eine weitgehende Unabhängigkeit des Strömungsfeldes von der Reynoldszahl existiert und die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus Modellversuchen auf den Originalmaßstab in erster Linie von der Einhaltung der Archimedeszahl abhängt.

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie sich für den vorliegenden Fall der Einfluss der Reynoldszahl am Einlass auf die Strömung im Frachtraum darstellt. Hierzu werden CFD-Simulationen durchgeführt, die sich durch eine Variation des Einlassvolumenstroms und damit in der mittleren Einlassgeschwindigkeit unterscheiden. Bei ansonsten identischen Simulationsbedingungen ergeben sich

unterschiedliche Einlassreynoldszahlen Re_0 . In Tabelle 6-1 sind die gewählten Einstellungen der Parameter am Einlass dargestellt.

Tabelle 6-1: Variation der Einlassparameter zur Untersuchung des Einflusses der Reynoldszahl am Einlass

Bezeichnung	$Re_0 / 1$	$\dot{V}_{Einlass} / 1/\text{min}$	$u_0 / \text{m/s}$
RE-1	3.420	20	6,60
RE-2	6.840	40	13,30
RE-3	10.280	60	20,00
RE-4	13.680	80	26,50
RE-5	17.100	100	33,10
RE-6	20.540	120	40,00
RE-7	23.960	140	46,66

Abbildung 6-1 belegt die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen. Diese zeigen beispielhaft an den drei Positionen M1, M2 und M3 den Einfluss der Einlassreynoldszahl auf die Geschwindigkeiten im Frachtraum. Es wird deutlich, dass der Verlauf der mit der Einlassgeschwindigkeit u_0 normierten Geschwindigkeit u bzw. v eine asymptotische Form annimmt. Für steigende Reynoldszahlen Re_0 nimmt der Einfluss derselben auf die Geschwindigkeiten ab. Schon bei Reynoldszahlen von ca. 15.000 ist der Einfluss auf die Geschwindigkeit sehr gering.

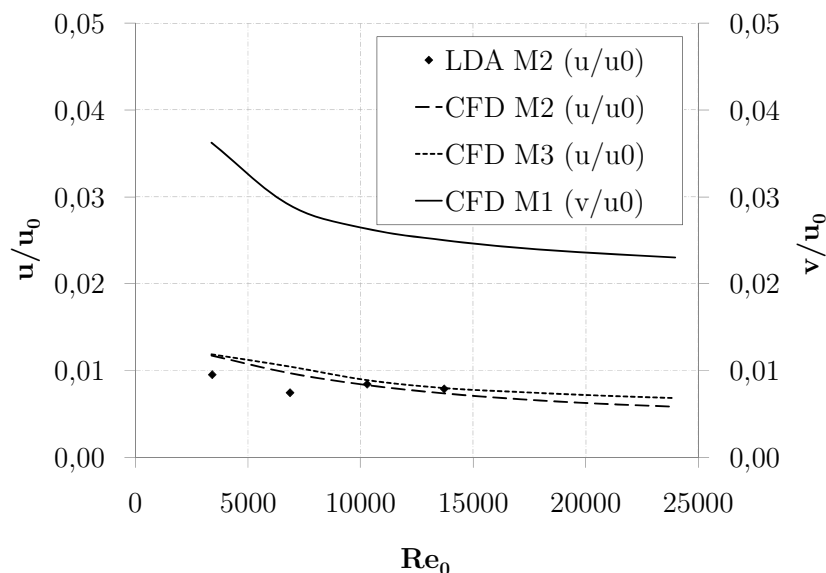


Abbildung 6-1: Darstellung des Einflusses der Einlassreynoldszahl auf die normierten Geschwindigkeiten an den Positionen M1, M2 und M3

Dieses Ergebnis bestätigt die von Müllejäns und Nielsen erarbeiteten Erkenntnisse. Für den vorliegenden Fall ergeben sich zwei Schlussfolgerungen:

- Einerseits bestätigt der geringe Einfluss der Einlassreynoldszahl auf das Strömungsfeld die Möglichkeit, mittels geeigneter Modellversuche CFD-Simulationen zu validieren. Die zugrundeliegende Problematik und die sich daraus ergebenden Einschränkungen werden in Abschnitt 3.2.1 erörtert.
- Andererseits ist der Einfluss der Einlassreynoldszahl auf den Stofftransport im Frachtraum ebenfalls zu untersuchen. Es ist nicht möglich, den geringen Einfluss von Re_0 auf das Strömungsfeld, insbesondere im Bereich der Durchströmung der Spalte zwischen den Containern, auf die Stofftransportmechanismen ohne weitere Untersuchung auf die Stofftransportvorgänge zu übertragen.

Einfluss der Einlassreynoldszahl auf den Stofftransport

Die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt legen eine Untersuchung des Einflusses von Re_0 auf den Stofftransport nahe. Diese wird für die beiden Belüftungsfälle B1 und B2 und die beiden Gefahrgutmassenstromverhältnisse $\alpha=1.000$ (a1) und $\alpha=100.000$ (a2) durchgeführt. Eine detaillierte Erörterung des Gefahrgutmassenstromverhältnisses α wird in Abschnitt 6.3.1 durchgeführt.

Eine Übersicht der Ergebnisse der Simulationen ist in Tabelle 6-2 dargestellt. Aufgeführt ist die mit der UZG von Toluol normierte Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ im Frachtraum. Die Übersicht verdeutlicht den Einfluss der Einlassreynoldszahl auf den Stofftransport im Frachtraum: Die Belüftung mit einer relativ geringen Einlassreynoldszahl im Fall B1 führt für beide Fälle von α zu einem ca. doppelt so hohen Wert für $C_i/C_{i,UZG}$ im Vergleich zum Belüftungsfall B2. Das Verhältnis der Reynoldszahlen zueinander beträgt indes $Re_{0(B1)}/Re_{0(B2)}=0,25$. Ursache hierfür ist der im vorangegangenen Abschnitt festgestellte nichtlineare Einfluss der Einlassreynoldszahl auf das Strömungsfeld.

Tabelle 6-2: Berechnete Werte für $C_i/C_{i,UZG}$ von Toluol im Modellfrachtraum

Belüftungsfall	$C_i/C_{i,UZG}$ (a1)	$C_i/C_{i,UZG}$ (a2)
B1	3,6E-01	3,0E-03
B2	1,5E-01	1,4E-03

In Abbildung 6-2 sind die Massenanteile Y_i von Toluol für die beiden Belüftungsfälle und Gefahrgutmassenstromverhältnisse für die Position M4 dargestellt. Der Verlauf der Massenanteile über der Frachtraumhöhe ist qualitativ für die beiden Belüftungsfälle unterschiedlich, es zeigen sich aber Maxima im unteren Bereich des Frachtraums (vergleiche hierzu auch 6.3.2). Quantitativ ergeben sich für Y_i große Unterschiede. Die Massenanteile von Toluol liegen im Fall B2 um ca. zwei Größenordnungen unter jenen im Fall B1. Das Verhältnis der Massenanteile entspricht also ebenfalls nicht dem Verhältnis der betrachteten Einlassreynoldszahlen. Dies unterstreicht die Ergebnisse aus Tabelle 6-2.

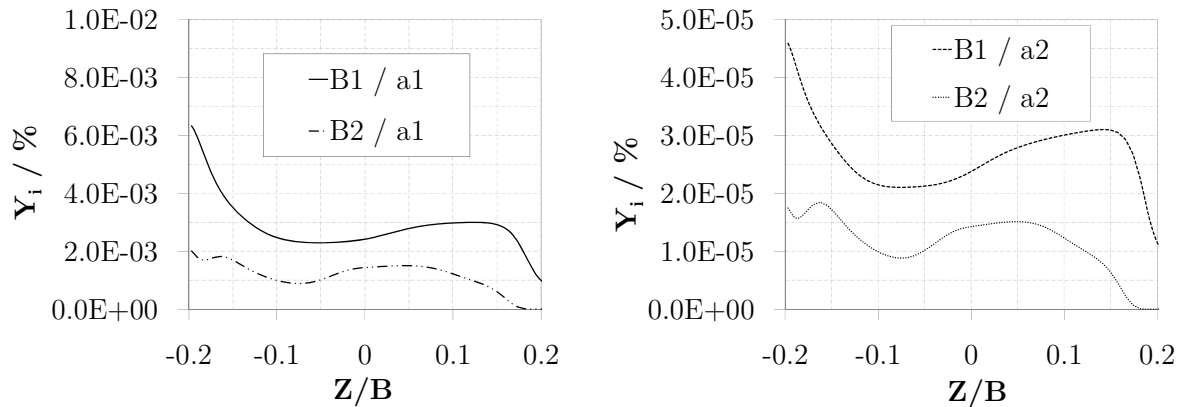


Abbildung 6-2: Darstellung des Massenanteils Y_i an der Position M4 für die beiden Belüftungsfälle B1 und B2 für die beiden Einlassmassenstromverhältnisse a_1 (links) und a_2 (rechts)

Für den Einfluss der Einlassreynoldszahl auf den Stofftransport ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Bewertung der Indikatoren Y_i und $C_i/C_{i,UZG}$ zeigt einen deutlichen Einfluss der Reynoldszahl am Einlass auf den Stofftransport: Für kleine Re_θ ergeben sich hohe Konzentrationen bzw. Massenanteile des betrachteten Gefahrguts, für große Re_θ sind diese Konzentrationen bzw. Massenanteile deutlich geringer.
- Die Massenanteile Y_i liegen für den Fall B2 bei ca. 30 ... 50 % der Werte für den Fall B1 an der betrachteten Position M4.
- Es wird deutlich, dass sich der Einfluss der Einlassreynoldszahl auf den Stofftransport ebenso nichtlinear wie der Einfluss derselben auf das Strömungsfeld darstellt: Eine Erhöhung von Re_θ um den Faktor vier führt nicht zu einer Reduktion der Konzentrationen um den Faktor vier, sondern lediglich um ca. den Faktor 2.

6.1.2 Einfluss der Einlassturbulenz

Der Einfluss von Turbulenzparametern wie des Turbulenzgrades und der turbulenten Skalenlänge am Einlass auf das Strömungsfeld wird in der Literatur unterschiedlich bewertet. Joubert et al. untersucht den Einfluss der Turbulenz am Einlass mittels RANS Simulationen für verschiedene Einlassprofile [129]. Die Ergebnisse zeigen keinen Einfluss der Turbulenzdissipation und des Turbulenzgrades auf das Strömungsfeld. Srebric bestätigt diese Ergebnisse [106]. Cao et al. untersucht den Einfluss der Turbulenz sowohl auf das Strömungsfeld, als auch auf den Stofftransport [130, 131]. Die Ergebnisse von Cao bestätigen jene von Joubert und Srebric, er ermittelt einen geringen Einfluss der Turbulenz auf das Strömungsfeld. Cao zeigt aber in den genannten Untersuchungen auch, dass die Turbulenz am Einlass einen signifikanten Einfluss auf den Stofftransport im Strömungsgebiet haben kann. Es ist daher zu prüfen, welchen Einfluss eine systematische Variation von Turbulenzparametern am Einlass auf

das Strömungsfeld und auf den Stofftransport im vorliegenden Fall des betrachteten Flugzeugfrachtraums hat.

Einfluss des Turbulenzgrades auf das Strömungsfeld

Als Charakteristikum für die Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf das Strömungsfeld wird der Turbulenzgrad verwendet. Dieser ist als Quotient der Strömungsgeschwindigkeit und der Schwankungsgeschwindigkeit nach Gleichung (3-11) definiert und wird in Prozent angegeben. Es werden die in der Literatur genannten, für Innenraumströmungen relevanten Turbulenzgrade von 5 %, 10 %, 20 %, 40 % und 60 % betrachtet [103]. Dabei werden Einlassvolumenströme von 15 l/min und 140 l/min verwendet, um einerseits eine realitätsnahe Strömung mit kleiner Reynoldszahl (2.570) und andererseits eine Einlassströmung mit großer Reynoldszahl (30.730) zu betrachten. Diese beiden Belüftungsfälle werden mit B1 und B3 bezeichnet. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 6-3 dargestellt.

Für den Einfluss auf das Strömungsfeld ergeben sich für die betrachteten Turbulenzgrade folgende Erkenntnisse:

- Im Bereich des Einlasses (M1) hat der Turbulenzgrad für den Fall B1 (Re_0 klein) einen deutlich sichtbaren Einfluss (siehe Abbildung 6-3 (a)) auf die Geschwindigkeit. Für den Fall B3 (Re_0 groß) ist der Einfluss des Turbulenzgrades auf die Geschwindigkeit kaum sichtbar (siehe Abbildung 6-3 (b)).
- Über die gesamte Breite des Frachtraumes ist im Spalt zwischen zwei Containern (M2) der Einfluss der Turbulenz auf die Geschwindigkeit für den Fall B1 vernachlässigbar (siehe Abbildung 6-3 (c)). Für den Fall B3 ist lokal im Bereich $X/B < 0,1$ (Bereich hoher Turbulenz) ein deutlicher Einfluss zu vermerken. Für den Bereich $X/B > 0,1$ ist der Einfluss der Turbulenz ebenfalls vernachlässigbar (siehe Abbildung 6-3 (d)).
- Für die Position M4 zeigt sich sowohl für den Fall B1 als auch für den Fall B3 kein Einfluss des Turbulenzgrades auf die Geschwindigkeit (siehe Abbildung 6-3 (e) und (f)).
- Insgesamt ist der Einfluss des Turbulenzgrades am Einlass auf die Geschwindigkeit im Frachtraum als gering zu bewerten. Nur lokal ergibt sich teilweise ein sichtbarer Einfluss. Dies bestätigt Untersuchungsergebnisse von Awbi [103]. Der Einfluss des Turbulenzgrades am Einlass wird aus diesem Grund für den vorliegenden Fall nicht weiter berücksichtigt.

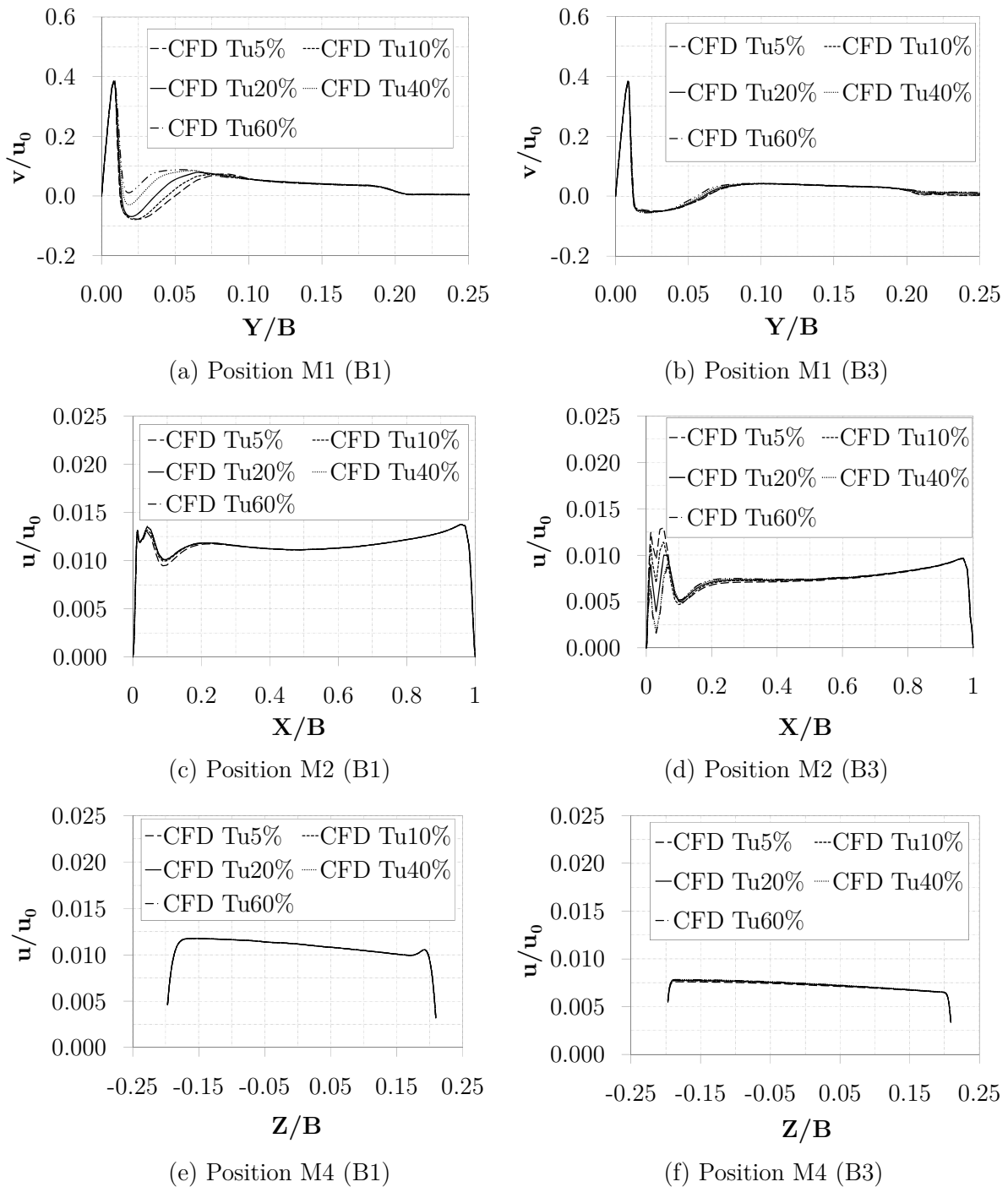


Abbildung 6-3: Geschwindigkeitsprofile aus CFD-Simulationen an ausgewählten Messpositionen für verschiedene Turbulenzgrade und Reynoldszahlen

Einfluss des Turbulenzgrades auf den Stofftransport

Für die Untersuchung des Einflusses des Turbulenzgrades auf den Stofftransport wird eine flächenförmige Gefahrstoffquelle verwendet (vergleiche Abschnitt 6.3.3). Zur Vereinfachung der Betrachtungen werden nur zwei Gasmassenströme definiert: Der Einlassmassenstrom (Luft) und der Massenstrom eines Gefahrstoffes (Toluol). Es wird

der Belüftungsfall B1 betrachtet und das Verhältnis von Gefahrgutmassenstrom zu Luftmassenstrom $\alpha=1000$ verwendet (siehe Abschnitt 6.3.1).

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Hierbei ist die globale, mit der UZG von Toluol normierte Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ für verschiedene Turbulenzgrade am Einlass dargestellt. Ein Einfluss von Tu_0 auf den globalen Stofftransport ist nicht erkennbar. Cao kann zeigen, dass mit steigender Turbulenz im Raum auch der Stofftransport zunimmt [131]. Da im vorliegenden Fall eine Veränderung des Einlassturbulenzgrades die Geschwindigkeit und die Turbulenz im Frachtraum kaum beeinflusst, ist auch ein Einfluss auf den globalen Stofftransport nicht zu verzeichnen. Die lokale Betrachtung bestätigt diese Beobachtung.

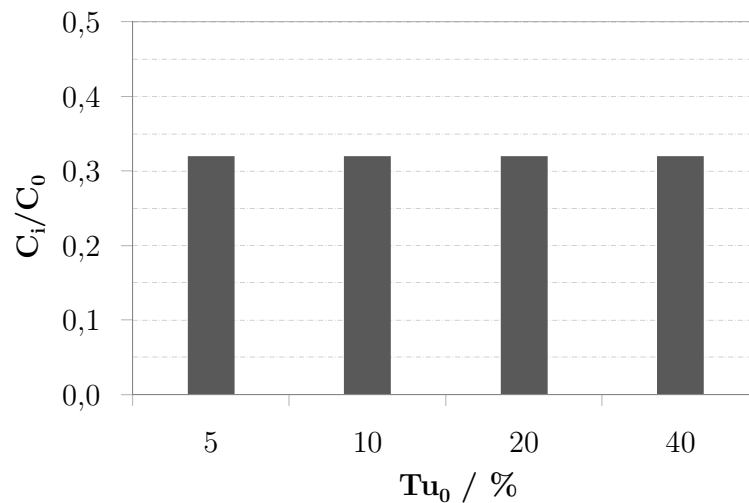


Abbildung 6-4: Darstellung der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ für verschiedene Turbulenzgrade am Einlass

Der Massenanteil Y_i von Toluol ist in Abbildung 6-5 für die Positionen M2 und M3 dargestellt. Ein Einfluss des Turbulenzgrades auf den Stofftransport ist auch für die Position M2, welche über die gesamte Frachtraumbreite verläuft, nicht erkennbar. An der Position M3, welche über die Frachtraumhöhe verläuft, ist ein geringer lokaler Einfluss des Turbulenzgrades auf den Stofftransport erkennbar. Der globale Massenanteils Y_i liegt ca. eine Größenordnung über der lokalen Änderung des Massenanteils, womit auch der lokale Einfluss des Turbulenzgrades am Einlass auf den Stofftransport vernachlässigbar ist.

Für den Einfluss auf den Stofftransport ergeben sich für die betrachteten Turbulenzgrade folgende Erkenntnisse:

- Der Turbulenzgrad am Einlass zeigt global keinen sichtbaren Einfluss auf den Stofftransport.
- Lokal ist ein Einfluss der Einlassturbulenz auf den Stofftransport erkennbar. Dieser Einfluss wirkt sich aber nicht global aus, sondern bleibt lokal sehr begrenzt.

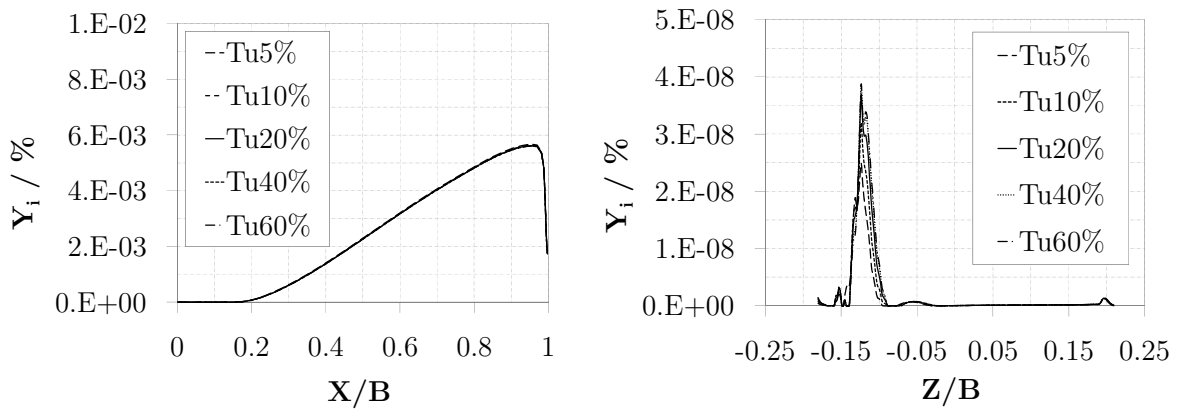


Abbildung 6-5: Verlauf des Massenanteils Y_i an der Position M2 (links) und an der Position M3 (rechts) für verschiedene Turbulenzgrade

6.2 Einfluss der Wand-Randbedingung

Im Folgenden wird der Einfluss von Wandrauigkeiten und Wandunebenheiten auf das Strömungsfeld untersucht. Die Untersuchungen werden mittels stationärer Simulationen durchgeführt. Motivation zur Untersuchung dieser Parameter ist die Tatsache, dass die Fracht im Flugzeug keine durchgehend glatten Oberflächen aufweist. Vielmehr haben beispielsweise ULD zwar weitgehend glatte Oberflächen aus Kunststoff oder Aluminium, weisen aber auch geometrische Unebenheiten im Bereich des Verstärkungsrahmens auf (siehe Abbildung 6-6).



Abbildung 6-6: Oberfläche eines ULD des Typs LD3/AKE und qualitative Positionierung der vorderen Wandunebenheiten W1 und W2

Die betrachteten Wandrauigkeiten sind in das numerische Modell auf zwei verschiedene Arten implementiert: Zum einen werden stochastische Oberflächenrauigkeiten betrachtet, wie sie beispielsweise aufgrund nicht glatter Oberflächen auftreten. Die Höhe der Unebenheiten ist hierbei dadurch begrenzt, dass in Ansys CFX® die Höhe des ersten Gitterelements an der betrachteten Wand gerade doppelt so hoch sein muss wie die Höhe der gewählten Rauigkeit [33]. Um im Rahmen von vertretbaren Werten für die Höhe des ersten Gitterelements zu bleiben (vergleiche Abschnitt 4.2.1), werden Rauigkeiten in der Größenordnung von 0 ... 0,25 mm betrachtet. Zum anderen werden geometrische Wandrauigkeiten mit verschiedenen Höhen bis zu $B_{Spalt}/H_{Unebenheit}=0,166$ implementiert.

Die Ergebnisse der Betrachtung der stochastischen Wandrauigkeiten sind für die Position M3 in Abbildung 6-7 dargestellt. Es wird deutlich, dass eine geringfügige Verzögerung der Geschwindigkeiten mit zunehmender Rauigkeit der Wand einhergeht. Maximal wird die Geschwindigkeit um ca. 8 % reduziert. Was physikalisch durch eine erhöhte Turbulenz an der Wand begründet ist. Die Wandrauigkeit hat allerdings in der betrachteten Größenordnung keinen Einfluss auf den qualitativen Verlauf der Geschwindigkeiten, sondern reduziert diese rein quantitativ und nur geringfügig.

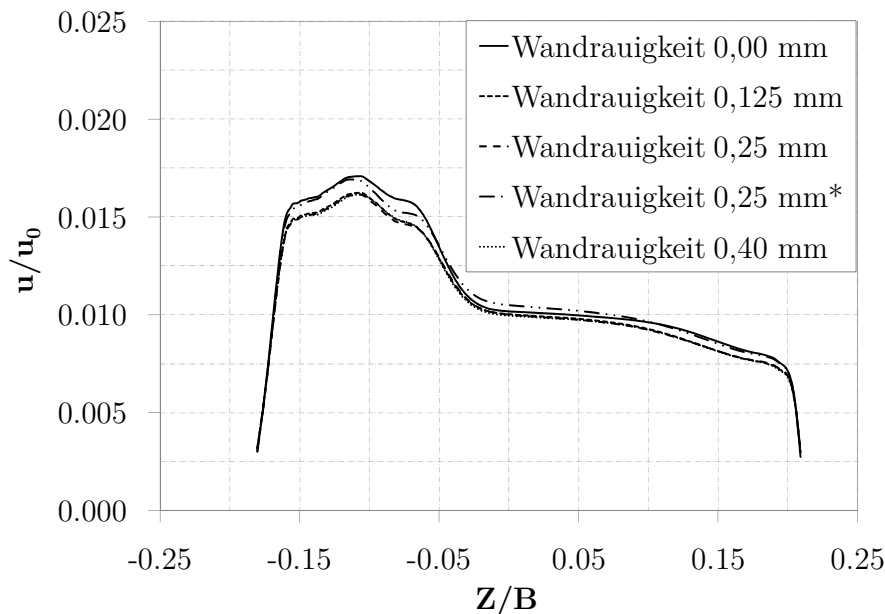


Abbildung 6-7: Beispielfhafte Darstellung des Einflusses der Wandrauigkeit auf die normierten Geschwindigkeiten an der Position M3

Aus Abbildung 6-7 ist ersichtlich, dass die genannte Vorgabe von Ansys CFX® für die Wahl der Höhe des ersten Gitterelements an der Wand einen signifikanten Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat. Die mit (*) bezeichnete Kurve (0,25 mm Rauigkeit) wird mittels eines nicht angepassten Gitters berechnet. Für diese Berechnung wird ein Gitter verwendet, bei dem die Höhe des ersten Elements nicht der doppelten Höhe der mittleren Rauigkeit entspricht. Als Ergebnis werden für den Bereich $-0,05 < Z/B < 0,10$

zum Teil höhere Werte für die Geschwindigkeit berechnet als für die glatte Wand (Wandrauigkeit 0,00 mm), was physikalisch kein sinnvolles Ergebnis darstellt. Die genannte Bedingung für die Gittergenierung ist daher zwingend einzuhalten, was zu den genannten Einschränkungen bei der Verwendung stochastischer Rauigkeiten führt.

Die Positionierung der untersuchten Wandunebenheiten W1, W2 und W3 ist Abbildung 6-8 zu entnehmen. Diese sind entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten positioniert (siehe Abbildung 6-6). Die beiden Unebenheiten W1 und W2 befinden sich im vorderen Bereich des Containers. W1 schließt sich direkt an die Containerwand im Bereich des Eintritts der Strömung in den Spalt zwischen zentralem Frachtcontainer und dem ersten danebenliegenden Container an. W2 liegt stromabwärts am Übergang zwischen dem horizontalen und dem angewinkelten Containerboden. Die Unebenheit W3 ist vergleichbar zu W2 im hinteren Bereich des Containers am Übergang zwischen dem horizontalen und dem angewinkelten Containerbodenbereich positioniert.

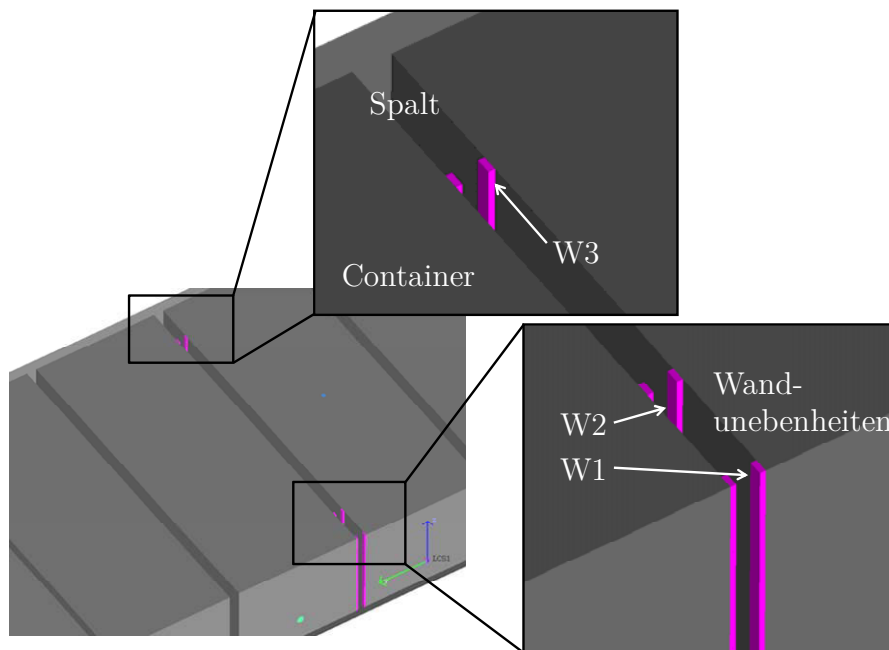


Abbildung 6-8: Darstellung der Wandunebenheiten W1, W2 und W3 im Spalt zwischen zwei Frachtcontainern

Die Ergebnisse der Betrachtung der Containerwand mit Unebenheiten im Spaltbereich sind für die Position M2 in Abbildung 6-9 dargestellt. Zum Vergleich sind hier auch die Ergebnisse der Simulation der glatten Wand und der rauhen Wand mit 0,4 mm Wandrauigkeit dargestellt. Insgesamt ist ein Einfluss der Unebenheiten feststellbar, der Einfluss bleibt aber lokal auf den Bereich der Unebenheiten für $X/B < 0,3$ und $X/B > 0,8$ begrenzt.

Grundsätzlich sind eine Verzögerung der Strömung vor den vorderen Unebenheiten und eine anschließende Beschleunigung sichtbar. Für den gesamten Bereich ab $X/B > 0,3$

nimmt die Geschwindigkeit die gleichen Werte an wie für den Fall der glatten Wand. Hierbei sind keine Auswirkungen der Unebenheiten erkennbar. Im Bereich ab $X/B > 0,8$ ist für die Konfiguration mit der Unebenheit W3 nochmals eine leichte Verzögerung und anschließende Beschleunigung feststellbar, aber auch hier bleiben die Auswirkungen lokal begrenzt. Die dargestellten Erkenntnisse gelten auch für die Schwankungsgeschwindigkeit der Strömung.

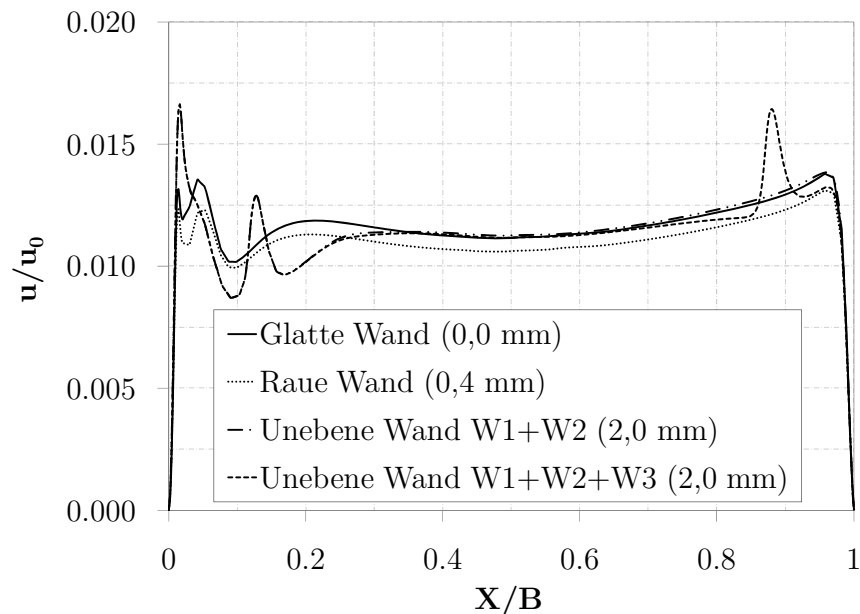


Abbildung 6-9: Darstellung des Einflusses der Wandunebenheiten auf die normierte Geschwindigkeit an der Position M2

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass größere Wandrauigkeiten in den untersuchten Größenordnungen eine geringfügige Verzögerung der Geschwindigkeiten bewirken, den Verlauf der Geschwindigkeiten aber nur quantitativ beeinflussen. Die hier betrachteten Wandunebenheiten üben nur einen geringen Einfluss im Vergleich zu den weiteren in dieser Arbeit untersuchten Einflussgrößen aus. Die hier beobachteten Effekte sind eher lokaler Natur und werden im Rahmen dieser Untersuchung vernachlässigt.

6.3 Einfluss unterschiedlicher Konfigurationen auf den Stofftransport

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Gefahrgut-Einlassmassenstroms (Verhältnis von Luftmassenstrom zu Gefahrgutmassenstrom), der Einfluss verschiedener Gefahrgüter (Toluol, n-Hexan, Methan und Ammoniakgas) und der Einfluss verschiedener Quelltypen untersucht. Es wird dabei jeweils nur ein Gefahrgut, das heißt keine Mischungen von Gefahrgütern, betrachtet.

6.3.1 Einfluss des Einlassmassenstroms von Gefahrgut

Als Ausgangspunkt der Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Konfigurationen auf den Stofftransport wird der Einfluss des Massenstroms eines Gefahrguts betrachtet. Hierzu werden Simulationen mit unterschiedlichen Einlassmassenstromverhältnissen durchgeführt und bewertet. Von besonderem Interesse ist die Auswirkung der Änderungen von α . Die Werte von α werden in fünf Schritten verändert, wodurch sich jeweils ein entsprechender Anwendungsfall ergibt, siehe Tabelle 6-3.

Tabelle 6-3: Variation des Verhältnisses α des Einlassmassenstroms von Gefahrgut zum Einlassmassenstrom von Luft in den Frachtraum und Anwendungsfälle

$\alpha / 1$	$\dot{m}_L / \text{g/s}$	$\dot{m}_G / \text{g/s}$	Leckagefall	Anwendungsfall
100	0,3	0,003	P + F2	ca. 640 Kanister Toluol / n-Hexan
1.000	0,3	0,0003	P + F2	ca. 64 Kanister Toluol / n-Hexan
10.000	0,3	0,00003	P + F2	ca. 6 Kanister Toluol / n-Hexan
100.000	0,3	0,000003	P + F2	ca. 1 Kanister Toluol / n-Hexan

Die Ergebnisse der Variation des Einlassmassenstromverhältnisses sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Es ist die normierte Konzentration C_i/C_0 für verschiedene Gefahrgut-Einlassmassenströme α von Toluol im Frachtraum aufgeführt. Deutlich wird hierbei, dass mit wachsendem Verhältnis α die normierte Konzentration sinkt, sich bei Werten ab 1.000 für α aber kaum mehr verändert. Ein weiterer Anstieg von α erzielt demnach keine deutliche Reduzierung des Verhältnisses C_i/C_0 . Die normierte Konzentration beträgt ab $\alpha=1000$ noch ca. 35 % des Wertes bei $\alpha=100$.

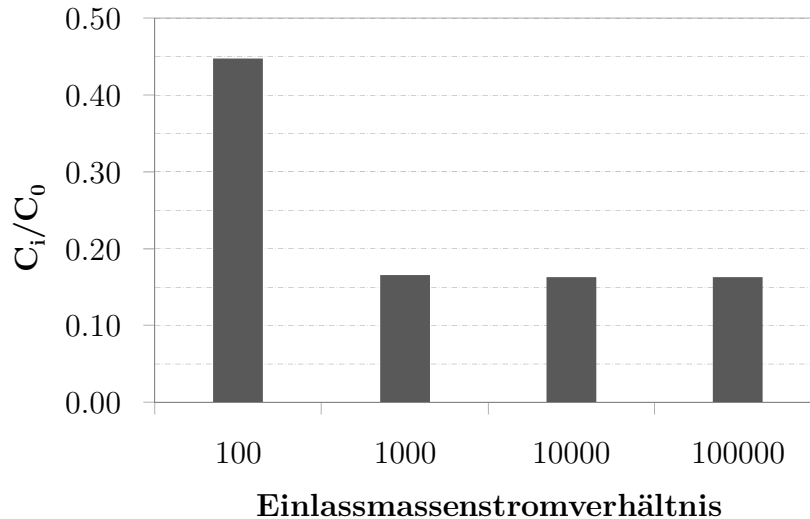


Abbildung 6-10: Vergleich der normierten Konzentration C_i/C_0 für verschiedene Werte von α im Frachtraum

In Abbildung 6-11 ist die normierte Geschwindigkeit u/u_0 bei Variation von α für die Positionen M2 und M3 dargestellt. Es ist ein Einfluss der verschiedenen Gefahrgut-Einlassmassenströme α auf das Geschwindigkeitsprofil erkennbar. Wie zuvor für die Entwicklung der normierten Konzentrationen C_i/C_0 wird auch für die Geschwindigkeit ein signifikanter Einfluss erst für $\alpha < 1000$ sichtbar. Für $\alpha = 100$ ergibt sich ein erheblich veränderter Geschwindigkeitsverlauf. Für die Position M2 führt dies zu einer Erhöhung im Bereich der Einströmung in den Spalt zwischen zentralem und erstem daneben angeordneten Container sowie zu einem größeren Gradienten der Geschwindigkeit im weiteren Verlauf der Strömung im Spalt. Für die Position M3 ist ebenfalls ein größerer Gradient der Geschwindigkeit über die Frachtraumhöhe zu erkennen. Für Werte von $\alpha > 1000$ sind die Unterschiede im Geschwindigkeitsverlauf sehr gering und können vernachlässigt werden.

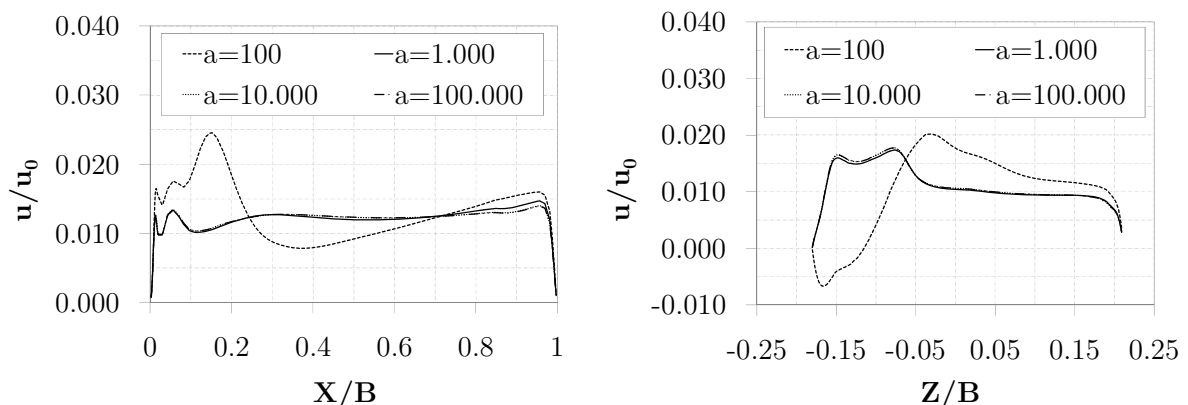


Abbildung 6-11: Darstellung der normierten Geschwindigkeit u/u_0 für verschiedene Werte α an der Position M2 (links) und an der Position M3 (rechts)

Für den Einfluss des Einlassmassenstroms von Gefahrgut auf den Stofftransport ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Insgesamt ist festzustellen, dass eine Variation des Einlassmassenstromverhältnisses α nur für Werte von $\alpha < 1000$ zu einem signifikanten Einfluss sowohl auf den Stofftransport als auch auf das Strömungsfeld im Frachtraum führt.
- Die gewählte Standard-Beladung entspricht einem Einlassmassenstromverhältnis von $\alpha = 1000$. Diese Beladung ist damit geeignet, alle Massenstromverhältnisse von $\alpha > 1000$ mit Abschätzung zur sicheren Seite abzubilden.
- Bei Massenstromverhältnissen von $\alpha < 1000$ ändert sich, wie gezeigt, das Strömungsfeld und der Stofftransport signifikant, sodass bei Untersuchungen solcher Massenstromverhältnisse die in dieser Arbeit erarbeiteten Erkenntnisse auf ihre Gültigkeit für den jeweils betrachteten Fall zu überprüfen sind.

6.3.2 Einfluss des Gefahrguttyps

Da sich verschiedene Gefahrgüter in ihren physikalischen Eigenschaften zum Teil stark unterscheiden, ist eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Gefahrgüter auf den Stofftransport sinnvoll. Insbesondere die Dichte eines Stoffes stellt eine relevante Eigenschaft dar, da sich in Abhängigkeit des Dichteverhältnisses zu Luft, dem Hauptbestandteil des strömenden Fluids, das Ausbreitungsverhalten eines Stoffes ändert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Stofftransport insbesondere von brennbaren Gefahrgütern der Klasse 3 betrachtet. Brennbare Dämpfe sind schwerer als Luft. Eine Ausnahme bildet der brennbare Cyanwasserstoff. Insgesamt gibt es elf brennbare Gase, die leichter als Luft sind [72]. Eine Klassifizierung der zu untersuchenden Stoffe in „schwerer als Luft“ und „leichter als Luft“ ist sinnvoll, da im Rahmen zukünftiger Untersuchungen zur vorliegenden Thematik auch Stoffe, die leichter als Luft sind, Gegenstand der Forschung sein können. Der Fokus in dieser Arbeit liegt aufgrund ihrer dominanten Bedeutung auf der Betrachtung von Stoffen mit der Eigenschaft „schwerer als Luft“.

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Dichteverhältnisses auf das Strömungsfeld und den Stofftransport für verschiedene Stoffdichten untersucht. Es werden die vier Stoffe Toluol und n-Hexan (schwerer als Luft) sowie Ammoniak und Methan (leichter als Luft) betrachtet. Methan und Ammoniak werden hier aufgrund ihrer Dichte verwendet, nicht aufgrund Ihrer Relevanz für den Gefahrguttransport im Luftverkehr. Es wird wie zuvor angenommen, dass die betrachteten Stoffe gasförmig aus einer Standard-Verpackung austreten. Die physikalischen Eigenschaften der vier Stoffe sind in Tabelle 6-4 dargestellt.

Tabelle 6-4: Physikalische Eigenschaften von n-Hexan, Toluol, Ammoniak und Methan [72]

Größe	n-Hexan	Toluol	Ammoniak	Methan
Summenformel	C_6H_{14}	C_7H_8	NH_3	CH_4
Molare Masse M_i	86,18	92,14	17,03	16,04
Spezifische Dichte (Dampf-Luft-Gemisch)	1,32	1,06	0,60	0,56
Klassifizierung (Vergleich mit Luft)	schwerer	schwerer	leichter	leichter

Die stationären Simulationen werden mit einem Einlassmassenstromverhältnis α von 100 durchgeführt. Als Einlassquelle wird Fq verwendet (siehe Abschnitt 6.3.3).

Abbildung 6-12 zeigt die Ergebnisse von CFD-Simulationen mit den vier betrachteten Stoffen an der Position M4. Dargestellt sind die Massenanteile der jeweiligen Stoffe Y_i und die normierten Geschwindigkeiten u/u_0 über der normierten Frachtraumhöhe Z/B . Entsprechend ihrer relativen Dichte zeigen die betrachteten Gefahrgüter einen deutlichen Einfluss auf das Stoffausbreitungsverhalten. So weisen Ammoniak und Methan (leichter als Luft) im oberen Bereich des Frachtraums und n-Hexan sowie Toluol (schwerer als Luft) im unteren Bereich des Frachtraums jeweils deutlich höhere Massenanteile auf. Die Stoffe Hexan und Toluol erreichen im Bereich $Z/B < 0$ Massenanteile bis ca. 15 %. Die Stoffe Ammoniak und Methan zeigen ein umgekehrtes Verhalten und erreichen im Bereich $Z/B > 0$ Massenanteile bis ca. 5 %.

Analog zum spezifischen Ausbreitungsverhalten der Stoffe gemäß ihrer Dichte stellen sich auch spezifische Strömungsgeschwindigkeiten ein. Im unteren Frachtraumbereich $Z/B < 0$ erreichen n-Hexan und Toluol Geschwindigkeitsmaxima, Methan und Ammoniak entsprechend im Bereich $Z/B > 0$.

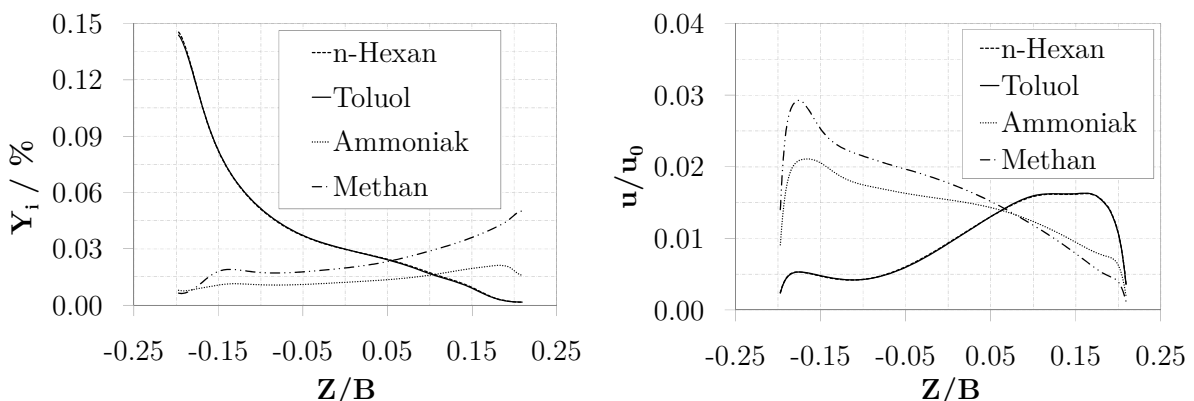


Abbildung 6-12: Darstellung des Massenanteils Y_i (links) und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 (rechts) an der Position M4 für die Stoffe n-Hexan, Toluol, Ammoniak und Methan

Das Strömungsfeld wird durch die Bereiche veränderter Dichte derart beeinflusst, dass sich im Bereich geringerer Dichte höhere Geschwindigkeiten einstellen. Bereiche höherer Dichte zeigen geringere Geschwindigkeiten. Die Erkenntnisse werden auch durch Abbildung 6-13 unterstützt. Dargestellt sind die Ergebnisse der Simulationen als zweidimensionale Konturplots der Massenanteile Y_i und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 sowie der resultierenden Geschwindigkeiten v in Vektorendarstellung für die Stoffe n-Hexan und Methan. Deutlich sichtbar sind höhere Massenanteile im unteren Bereich für n-Hexan bzw. im oberen Bereich für Methan in der Ebene E-L. Analog dazu liegen die Regionen höherer Geschwindigkeiten im oberen Bereich für n-Hexan bzw. im unteren Bereich für Methan.

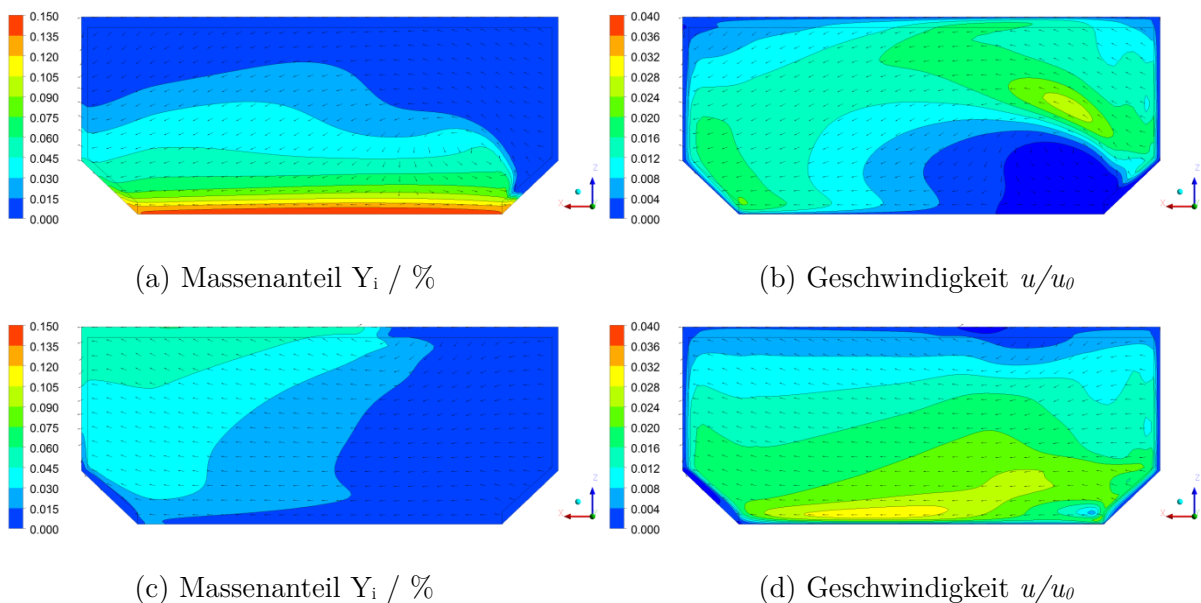


Abbildung 6-13: Darstellung des Massenanteils Y_i und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 für n-Hexan (oben, a und b) und für Methan (unten, c und d) in der Ebene E-L

Für den Einfluss des Gefahrguttyps auf den Stofftransport ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Sowohl das Strömungsfeld als auch die Stoffausbreitung sind stark von der spezifischen Dichte der Gefahrgüter abhängig.
- Leichte Gase steigen nach oben und breiten sich im oberen Bereich des Frachtraums aus, schwere Stoffe sinken nach unten und breiten sich im unteren Bereich des Frachtraums aus.
- Die in dieser Arbeit betrachteten Stoffen n-Hexan und Toluol bilden Dämpfe, die schwerer als Luft sind. Diese Stoffe sind daher geeignet, das typische Ausbreitungsverhalten von brennbaren Gefahrgütern der Klasse 3 im Frachtraum abzubilden.

- Bei Untersuchungen des Stofftransports im Flugzeugfrachtraum ist die spezifische Gasdichte zu berücksichtigen. Die Wahl der betrachteten Stoffe ist entsprechend zu treffen.

6.3.3 Einfluss der Gefahrgutquelle

Als weiterer Aspekt der Untersuchung unterschiedlicher Konfigurationen werden die verschiedenen Arten von Gefahrgutquellen bewertet. Hierfür werden stationäre Simulationen mit einem Einlassmassenstromverhältnis von $\alpha=1000$ durchgeführt. Es werden die in Abschnitt 4.1.4 dargestellten Einlassquellen verwendet. Die globale Auswirkung der Einlassquellen auf die Stoffausbreitung im Frachtraum zeigt Abbildung 6-14. Dargestellt ist die normierte Konzentration C_i/C_0 für die verschiedenen Gefahrgutquellen.

Es wird deutlich, dass die betrachteten Gefahrgutquellen unterschiedlich effektiv den Stofftransport in den Frachtraum ermöglichen. Die höchsten Werte von C_i/C_0 ergeben sich bei Verwendung einer mittig angeordneten Spaltquelle. Der Einlass sowohl über eine Flächenquelle als auch über eine Punktquelle führt zu geringeren Massenanteilen. Die Verwendung einer Spaltquelle mit stromabwärts seitiger Anordnung (SqH) führt zu den insgesamt niedrigsten Massenanteilen, da der Gasaustritt stromabwärts näher am Auslass liegt. Im Vergleich mit den Massenanteilen der Punktquelle (Vergleichswert 100 %) ergibt sich für SqM ein Wert von 139 %, für Fq ein Wert von 122 %, für SqH ein Wert von 41 % des Massenanteils.

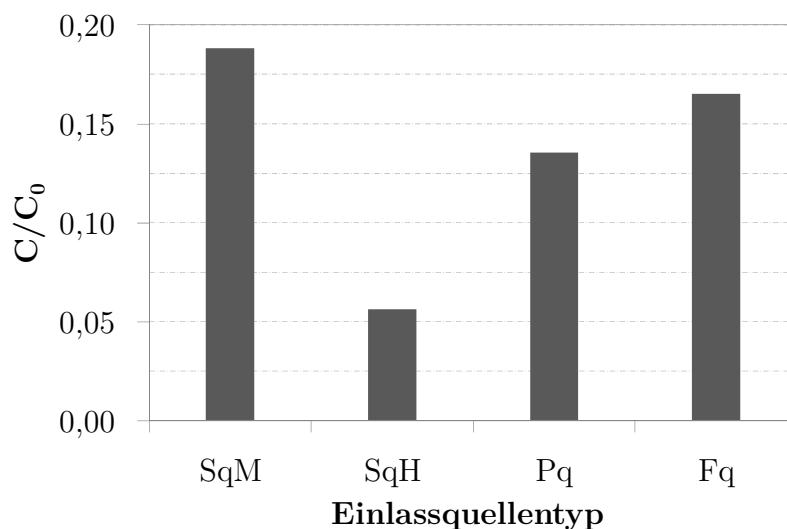


Abbildung 6-14: Vergleich der normierten Konzentrationen C_i/C_0 für die Einlassquellentypen Spaltquelle Mitte SqM, Spaltquelle Hinten SqH, Punktquelle Pq und Flächenquelle Fq

Abbildung 6-15 zeigt links den Massenanteil Y_i für die verschiedenen Gefahrgutquellen an der Position M2 und rechts an der Position M5. Die Darstellung des Verlaufs des Massenanteils über der normierten Frachtraumbreite und -höhe verdeutlicht den lokalen Einfluss der Einlassquellentypen auf die Gefahrgutausbreitung. An der Position M2 ergeben sich die höchsten Massenanteile für SqM, wie auch die globale Betrachtung in Abbildung 6-14 zeigt. Die Quellen Pq und Sq erzeugen lokale Erhöhungen der Massenanteile, die über die Frachtraumbreite geringer werden. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass sich aufgrund der spezifischen Dichte von Toluol (1,32, siehe Tabelle 2-7) ein Maximum des Massenanteils stets in Bodennähe ausbildet ($Z/B < -0,15$), M2 aber darüber liegt ($Z/B = 0$). Der Verlauf von Y_i über der Frachtraumhöhe an der Position M5 belegt dies. An der Position M5 weisen die Einlassquellentypen große Unterschiede auf. Die Einlassquellen Fq und SqM weisen an dieser Position nicht die höchsten Massenanteile auf, obwohl dies bei globaler Betrachtung der Fall ist. Pq wiederum weist bei M5 lokal in Bodennähe die höchsten Werte auf, welche dann im Bereich ab $Z/B > -0,05$ auf null abfallen. Global führt die Verwendung der Einlassquelle Pq zu geringeren Massenanteilen als Fq und SqM. Dies führt zu der Erkenntnis, dass der Einfluss der Einlassquelle stark von der betrachteten Position abhängt und allgemeingültige Aussagen zur Auswirkung eines Einlassquellentyps auf den Stofftransport nicht möglich sind. Es ist daher notwendig, jeweils die relevanten Bereiche oder Positionen im Frachtraum für die verwendete Einlassquelle zu bewerten.

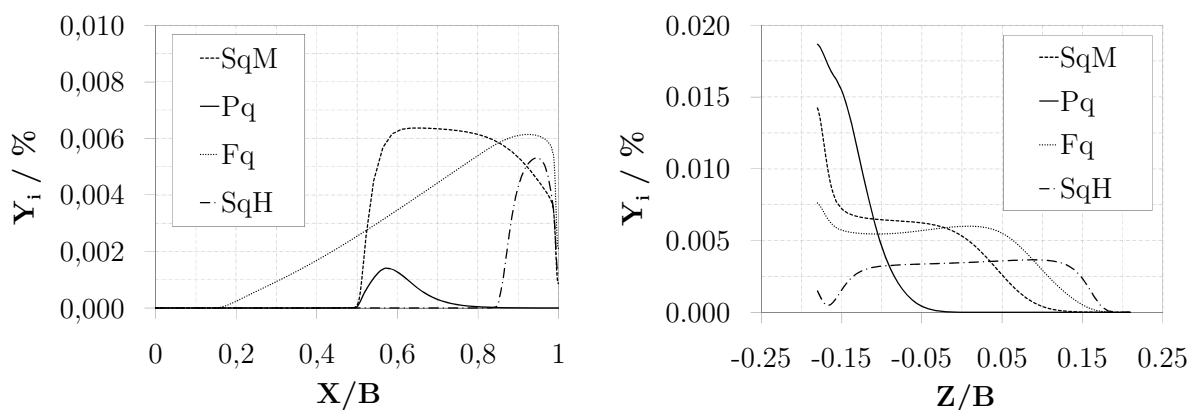


Abbildung 6-15: Massenanteile Y_i an der Position M2 (links) und an der Position M5 (rechts) für verschiedene Einlassquellentypen

6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Der Einfluss der Einlassreynoldszahl auf das Strömungsfeld erweist sich als gering und bestätigt damit Untersuchungsergebnisse anderer Autoren. Die Einlassreynoldszahl zeigt aber einen deutlichen Einfluss auf den Stofftransport:

Kleine Re_0 führen zu hohen Massenanteilen bzw. Konzentrationen, große Re_0 führen zu deutlich geringeren Massenanteilen bzw. Konzentrationen.

- Der Einfluss des Einlassturbulenzgrades auf das Strömungsfeld und den Stofftransport ist gering. Obwohl im Bereich des Einlasses eine Variation des Einlassturbulenzgrades deutlich sichtbare Auswirkungen hat, ist der Einfluss auf die Geschwindigkeiten und Turbulenz im Inneren des Frachtraumes gering und lokal beschränkt. Die turbulente Skalenlänge weist keinen relevanten Einfluss auf das Strömungsfeld auf. Der Turbulenzgrad am Einlass zeigt keinen sichtbaren Einfluss auf den Stofftransport.
- Die Implementierung einer stochastischen Wandrauigkeit zeigt eine geringfügige quantitative Verzögerung von ca. 8 % der Geschwindigkeitswerte. Der qualitative Verlauf der Geschwindigkeiten wird nicht beeinflusst. Geometrische Wandunebenheiten von bis zu $B_{Spalt}/H_{Unebenheit}=0,166$ zeigen lokale Beschleunigungs- und Verzögerungseffekte. Global wird das Strömungsfeld nur gering beeinflusst. Die Ergebnisse bestätigen die Gültigkeit des gewählten Modellaufbaus mit weitgehend glatten Wänden als geeignet für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen.
- Die Variation des Einlassmassenstromverhältnisses zeigt nur für Werte von $\alpha < 1000$ einen signifikanten Einfluss sowohl auf den Stofftransport als auch auf das Strömungsfeld. Die gewählte Standard-Beladung ist daher gut geeignet, alle Massenstromverhältnisse von $\alpha > 1000$ abzubilden.
- Für Untersuchungen des Stofftransports im Flugzeugfrachtraum ist die spezifische Dichte zu berücksichtigen, da diese einen großen Einfluss auf die Stoffausbreitung zeigt. Die Ergebnisse bestätigen die Erwartung, dass sich leichte Gase im oberen Bereich und schwere Stoffe im unteren Bereich des Frachtraums ausbreiten. Die in dieser Arbeit betrachteten Stoffe mit Dämpfen schwerer als Luft können das typische Ausbreitungsverhalten von brennbaren Gefahrgütern der Klasse 3 gut abbilden.
- Die Bewertung von vier realitätsnahen Gefahrgutquellen zeigt global die höchsten Massenanteile von Gefahrgut für eine mittig angeordnete Spaltquelle (SqM) und eine flächige Einlassquelle (Fq). Eine in der Nähe des Auslass positionierte Spaltquelle (SqH) führt global zu den geringsten Massenanteilen. Lokal ist der Einfluss des Quelltyps von der betrachteten Position abhängig und ermöglicht keine allgemeingültige Beurteilung. Fq wird als Standard-Gefahrgutquelle verwendet, da dieser Quelltyp sowohl den Gefahrgutmassenstrom aus Containern als auch aus Paletten repräsentiert und zu ähnlich hohen Konzentrationen im Frachtraum führt, wie SqM.

7 Simulation von Szenarien

Die Simulation und Bewertung realitätsnaher Szenarien des Austritts von Gefahrgut in den Flugzeugfrachtraum ist Gegenstand dieses Kapitels. Es werden zunächst vier definierte Modell-Szenarien verwendet, um den Stofftransport zu untersuchen. Anschließend wird der Stofftransport im Originalmaßstab mittels zweier generischer Transport-Szenarien untersucht. Ziel ist es, mittels transienter Simulationen zu zeigen, welche Stoffausbreitungen unter den definierten Randbedingungen auftreten und wie sich diese gemäß den gewählten Szenarien unterscheiden.

Für jedes Szenario wird zunächst jeweils der zeitliche und räumliche Verlauf der Stoffausbreitung dargestellt. Anschließend wird das Gefahrenpotential des Szenarios bewertet. Für die Bewertung des Gefahrenpotentials wird ein sicheres Unterschreiten der UZG für einen Grenzwert von 50 % der UZG definiert ($C_i/C_{i.UZG} < 0,5$). Dieser Wert orientiert sich an Richtwerten [69]. Durch eine Normierung von $V_{i.UZG.50\%}$ mit V_{Gesamt} ergibt sich der Anteil des Gesamtvolumens des Frachtraums, welcher 50 % der UZG erreicht oder überschreitet. $V_{i.UZG50\%}$ ist dabei jenes Volumen, in dem 50 % der UZG des Stoffes i erreicht wird. Nur wenn es sich bei diesem Volumen um eine zusammenhängende Ansammlung von Gefahrgut handelt, ist bei einer ausreichenden Ausdehnung des Bereichs mit einer Gefährdung zu rechnen. Eine die Sicherheit gefährdende Gefahrgutausdehnung wird für $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt} > 0,018$ des Frachtraumvolumens angenommen. Dies entspricht einem Volumenanteil am gesamten Frachtraumvolumen von drei Standard-Behältern.

7.1 Stofftransport bei Verwendung von Modell-Szenarien

7.1.1 Szenario MS-1

Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Stoffausbreitung

Abbildung 7-1 zeigt den zeitlichen Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ über die Simulationsdauer von 150 s. Dargestellt sind die Werte für die Positionen M3P3, M4P3 und M5P3. Diese Punkte liegen auf den Linien M3, M4 und M5 bei Z/B=-0,72. Wie gezeigt, sinkt Toluol aufgrund seiner spezifischen Dichte in den Bereich des Frachtraumbodens. Die Punkte werden daher in diesem Bereich definiert. Es wird deutlich, dass nennenswerte Konzentrationen nur für die Phase zwischen 0 ... 30 s auftreten. Der Austritt des Gefahrguts findet zwischen 5 ... 20 s statt. Nach ca. 30 s ist keine nennenswerte Stoffkonzentration mehr vorhanden.

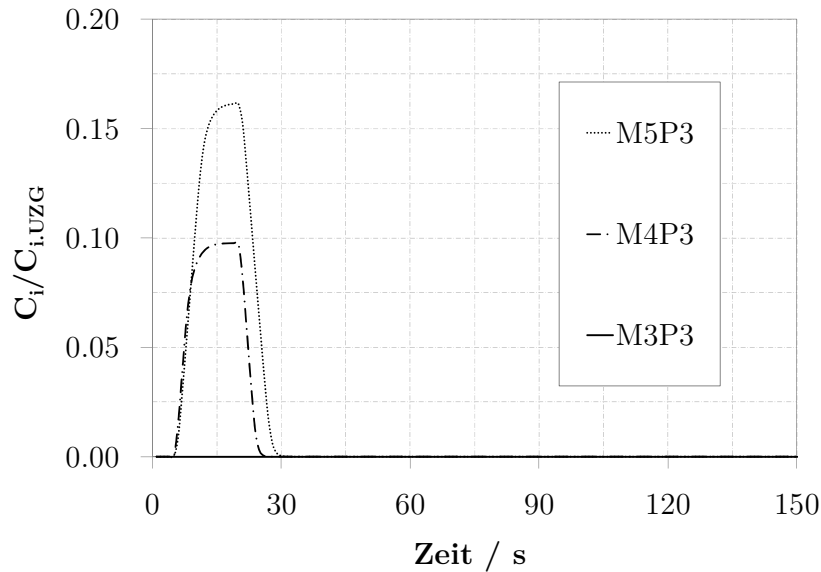


Abbildung 7-1: Vergleich der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ an verschiedenen Punkten in der Ebene E-L für das Szenario MS-1

Weiterhin wird deutlich, dass die höchsten Konzentrationen im hinteren Bereich des Frachtraums für den Punkt M5P3 auftreten, die Maximalwerte betragen hier ca. 16 % der UZG. Die Maximalwerte für den gesamten Frachtraum liegen bei ca. 35 % direkt am Boden im Bereich der Linie M5. In diesem Bereich steigt die Frachtraumwand an, was die Durchströmung des Bereichs verlangsamt (vergleiche Abbildung 3-6). Im Bereich des Punktes M4P3 betragen die Werte für $C_i/C_{i,UZG}$ nur noch ca. 2/3 der Werte am Punkt M5P3. Weiter in Strömungsrichtung liegen die Werte am Punkt M3P3 bei 0 % der UZG.

Abbildung 7-2 zeigt den räumlichen Verlauf von $C_{i,UZG20\%}$ für einige ausgewählte Zeitschritte für MS-1 im relevanten Zeitraum von 0 ... 40 s in einer isometrischen 3D-Ansicht des Frachtraums.

Da die UZG zu keiner Zeit und an keinem Ort erreicht wird, ist jenes Volumen dargestellt, welches mindestens 20 % der UZG ($C_{i,UZG20\%}$) erreicht. Zu Beginn der Simulation ist kein Gefahrgutmassenstrom vorhanden. Deutlich sichtbar ist der dann zunächst lokal begrenzte Masseneintritt im Bereich des Gefahrguteinlasses (Fq, grau schattiert) nach 10 s. Bei 20 s hat der Masseneintritt sein Maximum erreicht. Nach 22 s ist der Masseneintritt bereits beendet und das Gefahrgut wird in Richtung des Auslasses abtransportiert. Nach 24 s ist die Gefahrgutmasse weitgehend aus dem Frachtraum entfernt, es verbleibt ein kleiner Rest im Bereich unterhalb des Auslasses. Nach 30 s ist kein Gefahrgut mehr vorhanden.

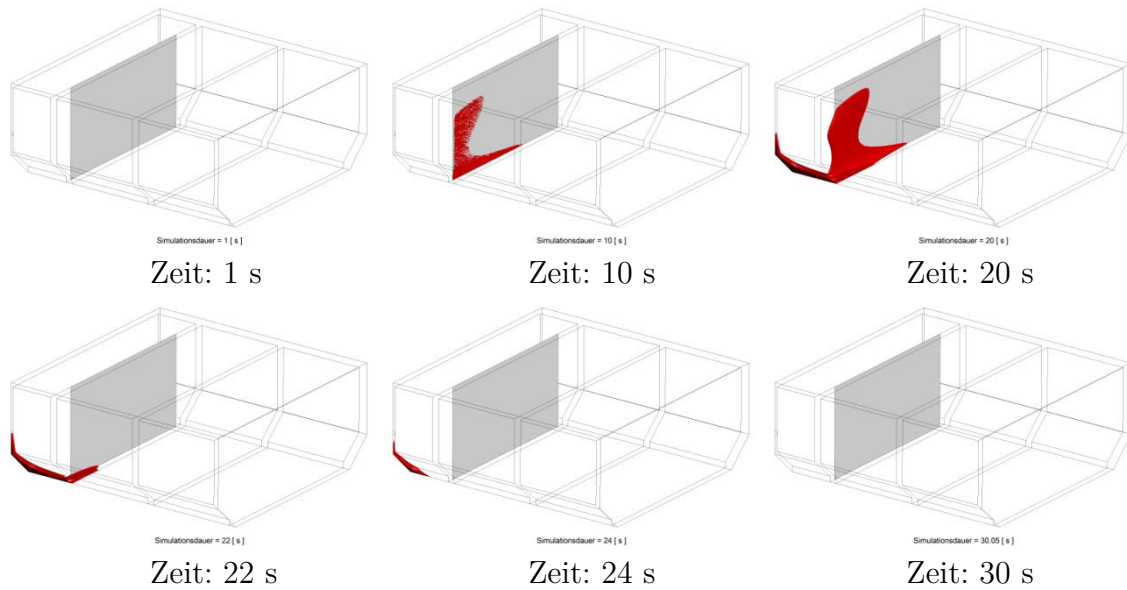


Abbildung 7-2: Vergleich von $C_{i,UZG} \geq 20\%$ für das Szenario MS-1 im Zeitraum 1 ... 30 s

Gefahrenpotential der Stoffausbreitung

In Abbildung 7-3 ist der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ und des normierten Volumens $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ über die Simulationsdauer von 150 s für den gesamten Frachtraum dargestellt. Wie bereits gezeigt, treten für das Szenario MS-1 nur im Zeitraum 0 ... 30 s erhöhte Gefahrgutkonzentrationen auf. Die Maximalwerte für $C_{i,UZG}$ im Frachtraum liegen bei ca. 35 % der UZG. Da die UZG in diesem Szenario nicht erreicht wird, liegen die Werte für $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ definitionsgemäß bei null.

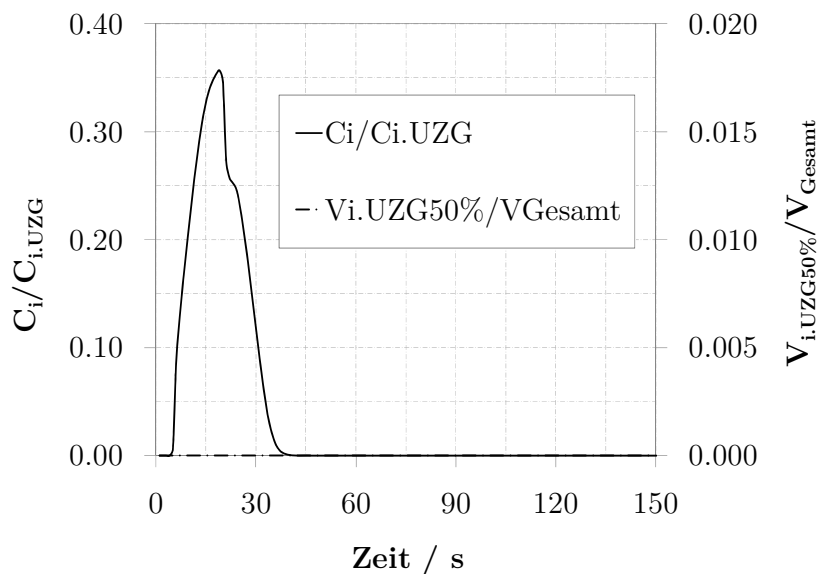


Abbildung 7-3: Verlauf von $C_i/C_{i,UZG}$ und $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-1

Die in Abbildung 7-2 dargestellte zeitliche und räumliche Entwicklung von $V_{i,UZG20\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-1 zeigt, dass eine Ansammlung von Gefahrgut im

Bereich geringerer Strömungsgeschwindigkeiten in der Region um M5 entsteht, sodass in diesen Bereichen ein zusammenhängendes Volumen erhöhter Konzentrationen vorliegt. Da diese Ansammlung von Gefahrgut aber nicht die genannte sicherheitsrelevante Grenze von 50 % der UZG erreicht, ist im Szenario MS-1 von einer Gefährdung nicht auszugehen.

7.1.2 Szenario MS-2

Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Stoffausbreitung

In Abbildung 7-4 ist der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ für das Szenario MS-2 dargestellt. Abgebildet sind die Werte für die Positionen M3P3, M4P3 und M5P3. Es wird deutlich, dass erhöhte Konzentrationen an den betrachteten Punkten für beinahe die gesamte Dauer des Szenarios zwischen 5 ... 150 s auftreten. Der Austritt des Gefahrguts findet in diesem Szenario zwischen 5 ... 150 s statt. Die Konzentrationen erreichen nach ca. 15 s ein Maximum, welches über die gesamte Dauer der Simulation konstant bleibt. Es stellt sich ein stationärer Gleichgewichtszustand ein. Die höchsten Konzentrationen treten im hinteren Bereich des Frachtraums an der Linie M5 auf und liegen bei ca. 35 % der UZG. Der Vergleich der gewählten Punkte zeigt die höchsten Konzentrationen für den Punkt M5P3 (ca. 16 % der UZG), am Punkt M4P3 liegen geringere Konzentrationen vor (ca. 10 % UZG), am Punkt M3P3 liegen die Werte bei 0 % der UZG.

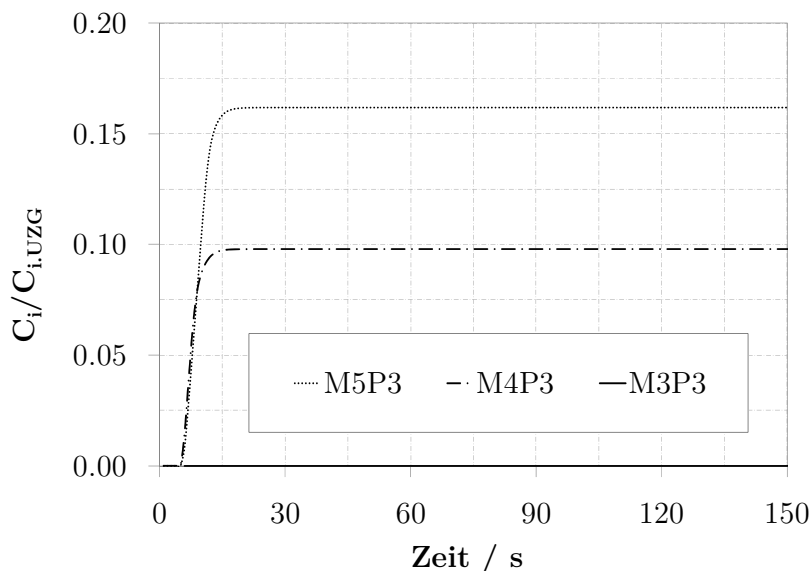


Abbildung 7-4: Vergleich der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ an verschiedenen Punkten in der Ebene E-L für das Szenario MS-2

Abbildung 7-5 zeigt den zeitlichen Verlauf von $C_{i,UZG20\%}$ für ausgewählte Zeitschritte in einer isometrischen 3D-Ansicht des Frachtraums. Da 100 % der UZG zu keiner Zeit und an keinem Ort erreicht wird, ist zur Verdeutlichung der Stoffausbreitung jenes Volumen

dargestellt, welches mindestens 20 % der UZG erreicht. Auch hier beginnt die Simulation zunächst ohne Gefahrgutmassenstrom. Nach 10 s wird der zunächst lokal begrenzte Gefahrgutmasseneintritt im Bereich des Gefahrguteinlasses (Fq, grau schattiert) sichtbar. Bei 20 s hat der Masseneintritt sein Maximum erreicht, welches in seiner räumlichen Ausprägung über die gesamte Simulationsdauer konstant bleibt. Es wird deutlich, dass bei konstantem Gefahrgutmasseneintritt ein stationärer Zustand im Frachtraum erreicht wird.

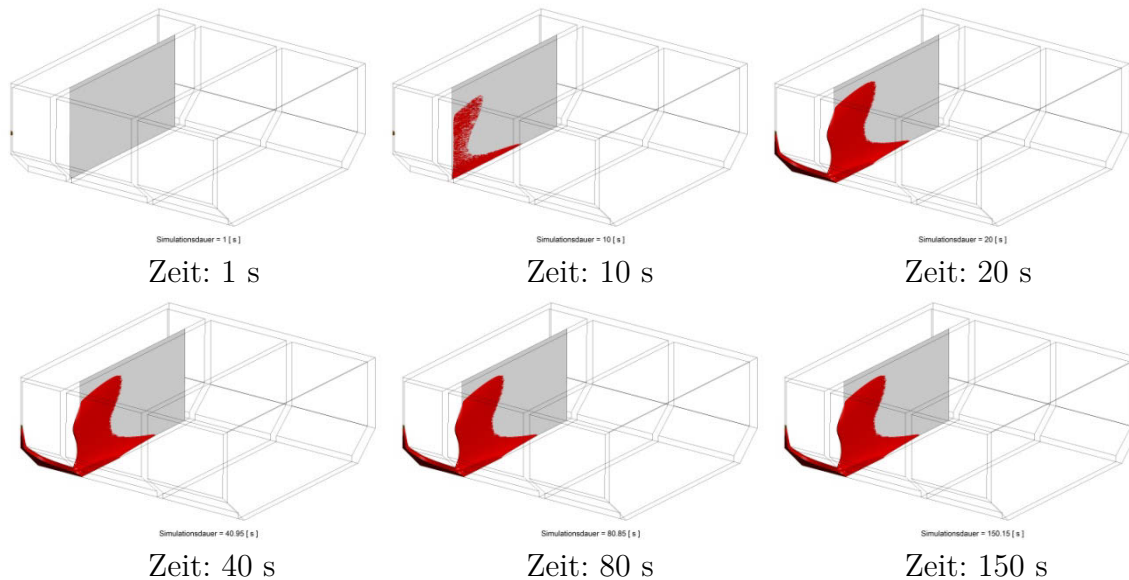


Abbildung 7-5: Vergleich von $C_{i,UZG} \geq 20\%$ für das Szenario MS-2 im Zeitraum 1 ... 150 s

Gefahrenpotential der Stoffausbreitung

Der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ und des normierten Volumens $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ im Frachtraum über der Simulationsdauer für das Szenario MS-2 ist in Abbildung 7-6 dargestellt. In diesem Szenario tritt eine erhöhte Konzentration im Zeitraum von 5 ... 150 s auf, also während des Austritts von Gefahrgut in diesem Szenario. Die maximale Konzentration erreicht im Szenario MS-2 im Frachtraum in etwa das gleiche maximale Niveau wie im Szenario MS-1, dieses liegt bei ca. 35 % der UZG. Auch im Szenario MS-2 wird der definierte sicherheitsrelevante Grenzwert von $C_i/C_{i,UZG} = 50\%$ nicht erreicht. Die Werte für $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ liegen bei null, da die UZG zu keinem Zeitpunkt und an keinem Ort im Frachtraum erreicht wird.

Aus der in Abbildung 7-5 gezeigten zeitlichen und räumlichen Entwicklung von $V_{i,UZG20\%}/V_{Gesamt}$ wird deutlich, wie eine Ansammlung von Gefahrgut im Bereich geringerer Strömungsgeschwindigkeiten in der Region um M5 entsteht und ein zusammenhängendes Volumen erhöhter Konzentration in diesem Bereich bildet.

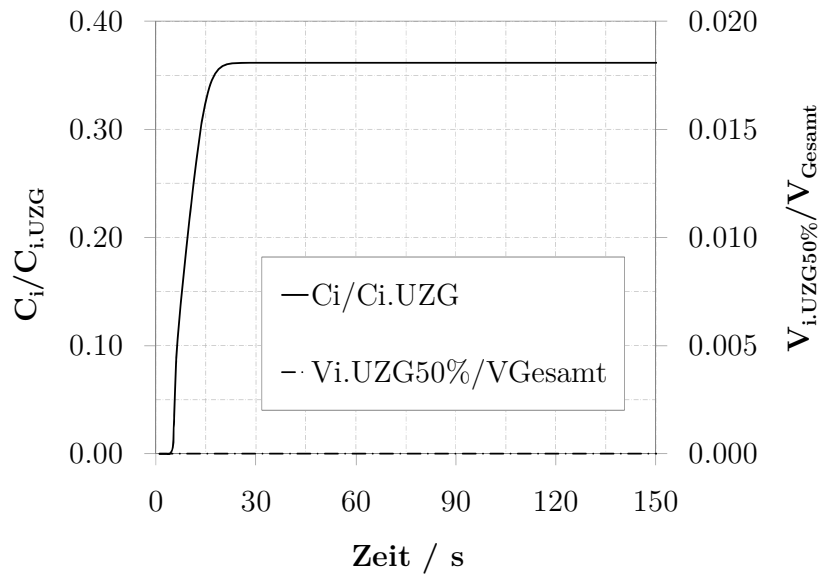


Abbildung 7-6: Verlauf von $C_i/C_{i.UZG}$ und $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-2

Diese Ansammlung wird über die Simulationszeit nicht wieder aus dem Frachtraum abtransportiert, da der Gefahrgutmassenstrom dauerhaft aktiv ist. Da diese Ansammlung von Gefahrgut aber nicht die sicherheitsrelevante Grenze von 50 % der UZG erreicht, ist im Szenario MS-2 nur von einer geringen Gefährdung auszugehen.

7.1.3 Szenario MS-3

Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Stoffausbreitung

In Abbildung 7-7 ist der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ für das Szenario MS-3 dargestellt. Abgebildet sind die Werte für die Positionen M3P3, M4P3 und M5P3. Es zeigt sich eine erhöhte Konzentration an den betrachteten Punkten für die gesamte Dauer des Szenarios ab einer Simulationsdauer von 5 s. In diesem Szenario wird ein aktiver Gefahrgutmassenstrom zwischen 5 ... 20 s verwendet. Die Konzentrationen erreichen nach ca. 25 s ein Maximum bei ca. 37 % der UZG. Anschließend fällt die Konzentration ab, erreicht nach 150 s aber noch immer Werte von ca. 20 % der UZG. Die Konzentrationen sind an den betrachteten Punkten in etwa gleich hoch.

Die räumliche Ausbreitung des Gefahrguts ergibt sich aus Abbildung 7-8. Hier ist der zeitliche Verlauf von $C_{i.UZG20\%}$ für ausgewählte Zeitschritte in einer isometrischen 3D-Ansicht des Frachtraums dargestellt. Da die UZG zu keiner Zeit und an keinem Ort erreicht wird, ist jenes Volumen dargestellt, welches mindestens 20 % der UZG erreicht.

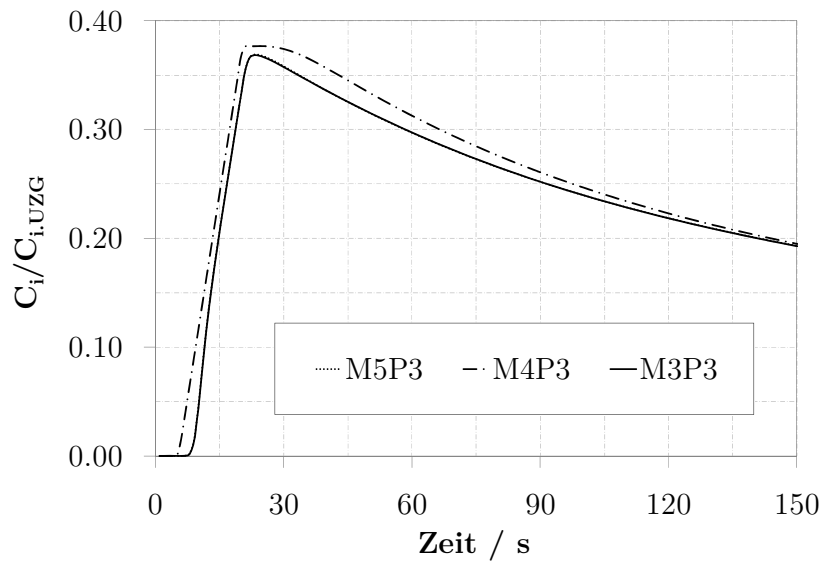


Abbildung 7-7: Vergleich der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ an verschiedenen Punkten in der Ebene E-L für das Szenario MS-3

Die Simulation wird ohne Gefahrgutmassenstrom begonnen. Nach ca. 10 s wird der zunächst lokal begrenzte Gefahrgutmasseneintritt im Bereich des Gefahrguteinlasses (F_q , grau schattiert) sichtbar. Nach 20 s ist der Gefahrgutmasseneintritt beendet. Da keine aktive Belüftung vorhanden ist, reduziert sich die Gesamtmasse des Gefahrguts anschließend nur langsam. Ein stationärer Zustand wird dabei nicht erreicht, die Gefahrgutmasse reduziert sich stetig und langsam.

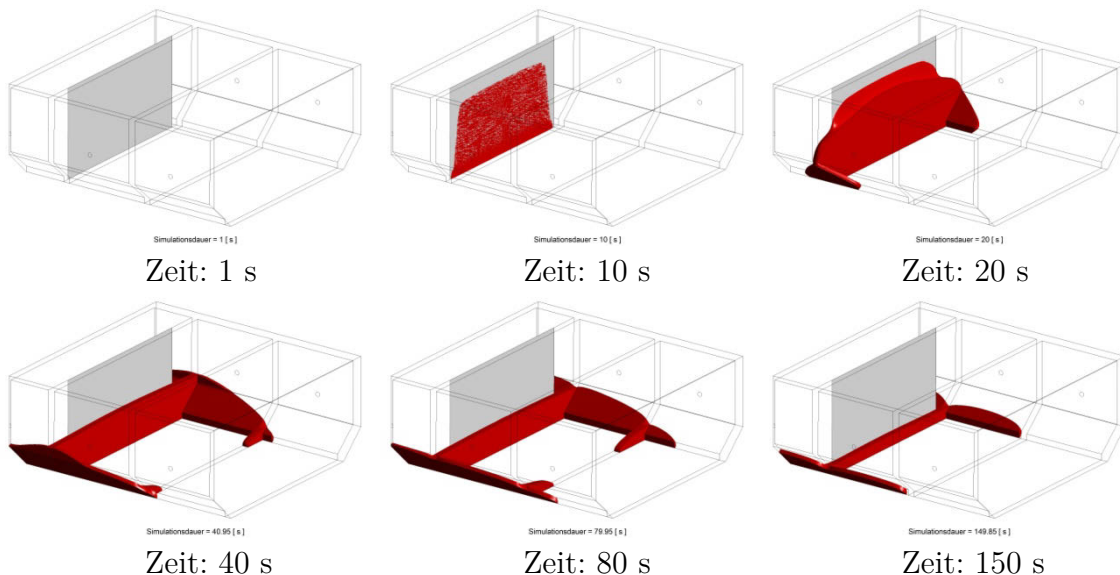


Abbildung 7-8: Vergleich von $C_{i,UZG} \geq 20\%$ für das Szenario MS-3 im Zeitraum 1 ... 150 s

Gefahrenpotential der Stoffausbreitung

Abbildung 7-9 zeigt den zeitlichen Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ und des normierten Volumens $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-3. Es treten in diesem Szenario über den gesamten Simulationszeitraum ab 5 s erhöhte Gefahrgutkonzentrationen auf. Innerhalb kurzer Zeit nach Beginn des Gefahrgutmassenstroms erreichen diese den Maximalwert von $C_i/C_{i.UZG}=45\%$ der UZG. Da 50 % der UZG in diesem Szenario nicht erreicht werden, liegen die Werte für $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ definitionsgemäß bei null.

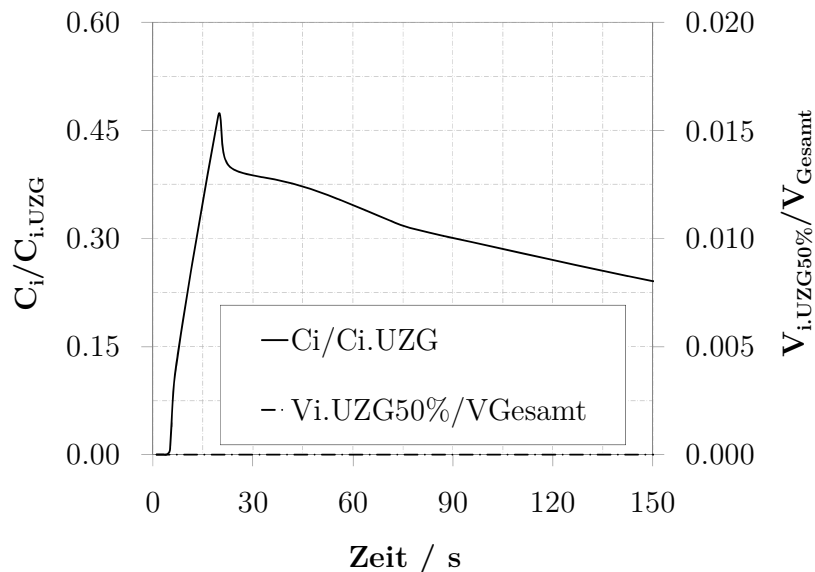


Abbildung 7-9: Verlauf von $C_i/C_{i.UZG}$ und von $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-3

Die in Abbildung 7-8 dargestellte zeitliche und räumliche Entwicklung von $V_{i.UZG.20\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-3 zeigt einen Maximalwert von $C_i/C_{i.UZG}=45\%$. Damit liegen die Konzentrationen nur geringfügig unter dem definierten Wert von 50 % der UZG. Es wird deutlich, dass die Ansammlung von Gefahrgut nicht nur im Spalt zwischen den Containern entsteht, sondern einen größeren Bereich des Frachtraums einnimmt. Die Ansammlung von Gefahrgut erreicht allerdings nicht die genannte sicherheitsrelevante Grenze von 50 % der UZG, sodass von einer Gefährdung im Szenario MS-3 nicht zwangsläufig ausgegangen werden muss. Möglicherweise führt aber schon eine geringfügig längere Dauer eines aktiven Gefahrgutmassenstroms zu Werten von $C_i/C_{i.UZG}>50\%$. Vor diesem Hintergrund ist aufgrund der Nähe der Konzentrationswerte zur sicherheitsrelevanten Grenze von 50 % der UZG das Szenario MS-3 als tendenziell gefährlich einzustufen.

7.1.4 Szenario MS-4

Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Stoffausbreitung

Abbildung 7-10 zeigt den zeitlichen Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ über die Simulationsdauer von 150 s an den Positionen M3P3, M4P3 und M5P3.

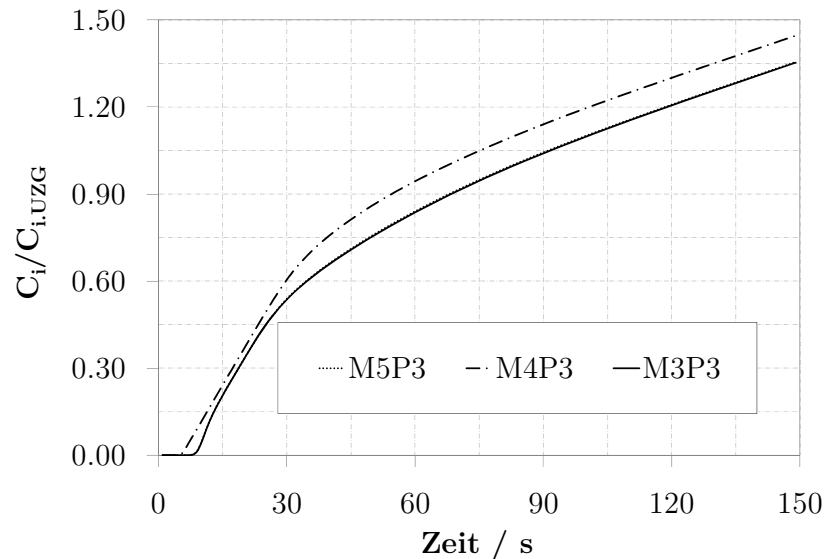


Abbildung 7-10: Vergleich der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ an verschiedenen Punkten in der Ebene E-L für das Szenario MS-4

Eine erhöhte Konzentration ist an den betrachteten Punkten für die gesamte Dauer des Szenarios ab einer Simulationsdauer von ca. 5 s zu erkennen. In diesem Szenario wird ein aktiver Gefahrgutmassenstrom zwischen 5 ... 150 s verwendet..

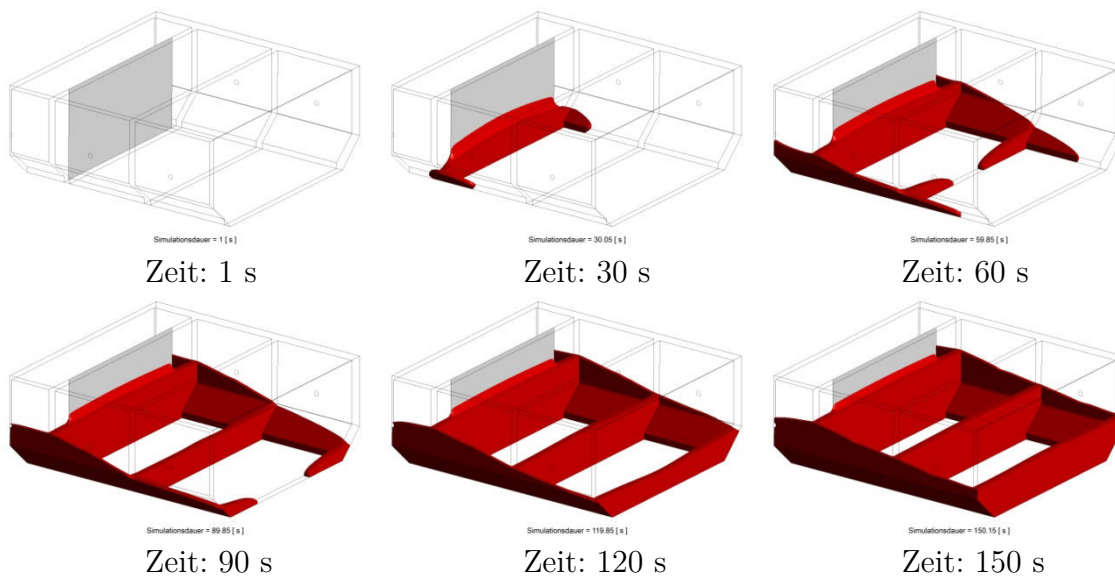


Abbildung 7-11: Vergleich von $C_{i.UZG} \geq 20\%$ für das Szenario MS-4 im Zeitraum 1 ... 150 s

Die Konzentrationen steigen während der Dauer des aktiven Gefahrgutmassenstroms stetig an. Der Endwert der betrachteten Punkte liegt bei ca. 150 % der UZG

In Abbildung 7-11 ist die räumliche Ausbreitung aus dem zeitlichen Verlauf von $C_{i,UZG20\%}$ für ausgewählte Zeitschritte in einer isometrischen 3D-Ansicht des Frachtraums erkennbar. Dargestellt ist jenes Volumen, welches mindestens 20 % der UZG erreicht. In diesem Szenario ist eine aktive Belüftung nicht vorhanden und der Gefahrgutmassenstrom ist während des gesamten Szenarios ab einer Simulationsdauer von ca. 5 s aktiv. Die Gefahrgutmasse steigt stetig an und erreicht zum Ende des Szenarios ihren höchsten Wert.

Gefahrenpotential der Stoffausbreitung

Der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ und des normierten Volumens $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-4 ist in Abbildung 7-12 dargestellt. Es treten über den gesamten Simulationszeitraum ab ca. 5 s erhöhte Gefahrgutkonzentrationen auf. Nach Beginn des Gefahrgutmassenstroms steigen die Konzentrationen im Frachtraum stetig an und erreichen zum Ende der Simulationsdauer maximale Werte von $C_i/C_{i,UZG}=185\%$ der UZG. Der definierte Sicherheitsabstand von 50 % der UZG wird in diesem Szenario um den Faktor 4 überschritten. Der Indikator $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ erreicht Werte von ca. 35 %, sodass der Grenzwert von 1,8 % um ein Vielfaches überschritten wird.

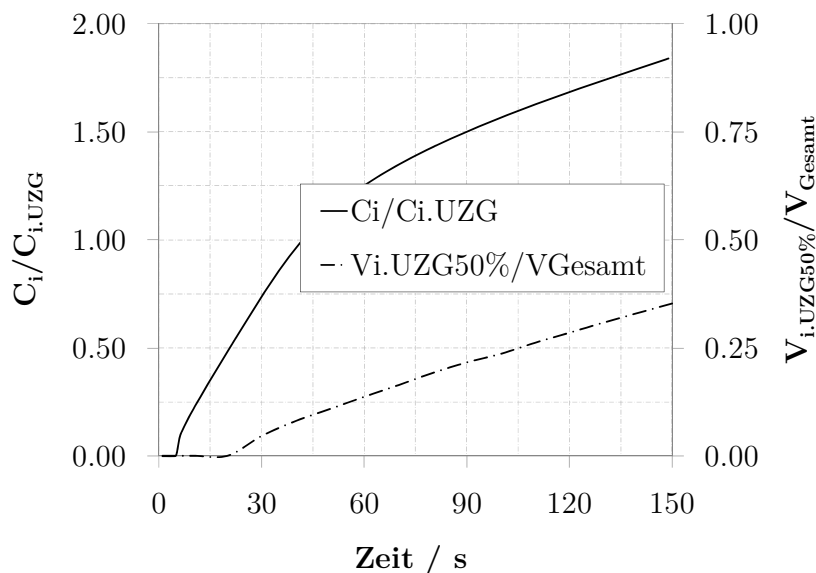


Abbildung 7-12: Verlauf von $C_i/C_{i,UZG}$ und von $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-4

Die räumliche Entwicklung von $V_{i,UZG20\%}/V_{Gesamt}$ für das Szenario MS-4 über der Zeit, welche in Abbildung 7-11 dargestellt ist, zeigt dass die Konzentrationen in diesem Szenario deutlich über der sicherheitsrelevanten Grenze von 50 % der UZG liegen. Die

Ansammlung von Gefahrgut erreicht alle bodennahen Bereiche des Frachtraums. Die UZG wird klar überschritten und das vom Gefahrgut eingenommene Volumen ist relativ groß. Vor diesem Hintergrund ist das Szenario MS-4 als kritisch zu bewerten und ist als gefährlich einzustufen.

7.1.5 Bewertung der Modell-Szenarien

Annahmen

Die Bewertung der Ergebnisse aus Modellszenarien erfolgt anhand der getroffenen Annahmen und Grenzen des gewählten Ansatzes. Die Szenarien stellen eine konservative Betrachtung dar, indem für jeden Aspekt eine möglichst ungünstige Annahme definiert wird.

Die verwendete Standard-Beladung besteht aus 64 Stück Standard-Behältern, die zu 100 % als undicht betrachtet werden. Es wird gezeigt, dass sich bei Stichproben der BAM ca. 40 % der geprüften Behälter als undicht erweisen. Die Leckageraten gehen vom ungünstigsten Leckagefall F2 aus (siehe Abschnitt 2.4.2) und liegen damit um ca. eine Größenordnung über dem wahrscheinlicheren Fall F1. Der Austritt des Gefahrguts erfolgt über eine flächige Austrittsquelle. Der Austritt aus der Quelle F_q führt zu höheren Massenanteilen von Gefahrgut im Vergleich mit anderen Einlassquellen. Die Positionierung der Einlassquelle im Spalt zwischen den Containern (Bereich der Ebene E-L) führt zu einem erschwerten Abtransport des Gefahrguts, da brennbare Gase schwere Dämpfe bilden, die nach unten sinken. Da die Einlassquelle bis zum Boden reicht, erreichen die Dämpfe auf kürzestem Weg den Frachtraumboden, wo sie sich tendenziell ausbreiten können. Im Fall der Szenarien MS-2 bzw. MS-4 dauert der Gefahrgutmassenstrom über die gesamte Simulationsdauer an, sodass dieser Aspekt ebenfalls die ungünstigste Variante darstellt.

Grenzen

Der gewählte Ansatz der Untersuchung basiert auf der Verwendung eines generischen Flugzeugfrachtraummodells. Nicht eine möglichst hohe Detailtreue in der Nachbildung steht hierbei im Vordergrund, sondern die Abbildung typischer Merkmale aktueller Flugzeugtypen. Die verwendeten Szenarien der Gefahrgutausbreitung sind auf die wesentlichen Merkmale tatsächlicher Flugszenarien reduziert (Beladung, Leckageraten und Belüftung) und lassen andere Aspekte außer Acht (physikalische Flugdauer, Wärmeeintrag in Frachtraum, etc.).

Fazit

Die beiden Szenarien MS-1 und MS-2 mit aktiver Frachtraumbelüftung sind im Rahmen der betrachteten Randbedingungen als eher unkritisch zu beurteilen. Es treten zwar deutlich erkennbar Gefahrgutansammlungen auf, diese werden aber durch die

vorhandene Strömung im Frachtraum abtransportiert. Die absoluten Werte der Konzentrationen liegen im Bereich von ca. 35 % der UZG. Je länger jedoch ein aktiver Gefahrgutmassenstrom andauert, desto weniger ist auch die aktive Belüftung in der Lage, die Gefahrgutansammlung aus dem Frachtraum zu entfernen.

Die beiden Szenarien ohne aktive Frachtraumbelüftung MS-3 und MS-4 sind im Rahmen der betrachteten Randbedingungen als kritischer einzustufen. Schon das Szenario MS-3 mit zeitlich begrenztem Gefahrgutmassenstrom ist aufgrund der auftretenden Konzentrationswerte nahe dem Sicherheitsabstand von der UZG tendenziell als gefährlich einzustufen. Das Szenario MS-4 bewirkt eindeutig kritische Konzentrationsniveaus im Frachtraum und ist damit als gefährlich einzustufen.

7.2 Stofftransport bei Verwendung von Transport-Szenarien

Die Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen des Stofftransports in einem skalierten Modellfrachtraum zeigen das Gefahrenpotential insbesondere für nicht aktiv belüftete Frachträume auf. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse im Modellmaßstab auf Transport-Szenarien im Originalmaßstab ist Gegenstand dieses Abschnitts.

7.2.1 Szenario OS-1

Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Stoffausbreitung

Abbildung 7-13 zeigt den zeitlichen Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ im Szenario OS-1 über eine Simulationsdauer von 150 s. Dargestellt sind die Werte für die Positionen M3P3, M4P3 und M5P3.

Wie bereits gezeigt, sinkt Toluol aufgrund seiner spezifischen Dichte in den Bereich des Frachtraumbodens. Es wird deutlich, dass in diesem Szenario Konzentrationen hauptsächlich während des Zeitraums von 5 ... 75 s auftreten. Der Austritt des Gefahrguts findet bei einer Simulationsdauer von 5 ... 20 s statt. Nach einer Simulationsdauer von ca. 75 s gehen die Konzentrationen auf geringe Werte nahe null zurück, nur im mittleren Bereich des Spalts in der Region um M4 bleiben weiterhin geringe Konzentrationen bis ca. 5 % bestehen. Die höchsten Konzentrationen treten im mittleren Bereich des Frachtraums für den Punkt M4P3 auf. Die Maximalwerte für den gesamten Frachtraum liegen bei ca. 225 % im Bodenbereich der Linie M5, wobei die Ansammlung eine Ausdehnung von ca. 0,9 % erreicht.

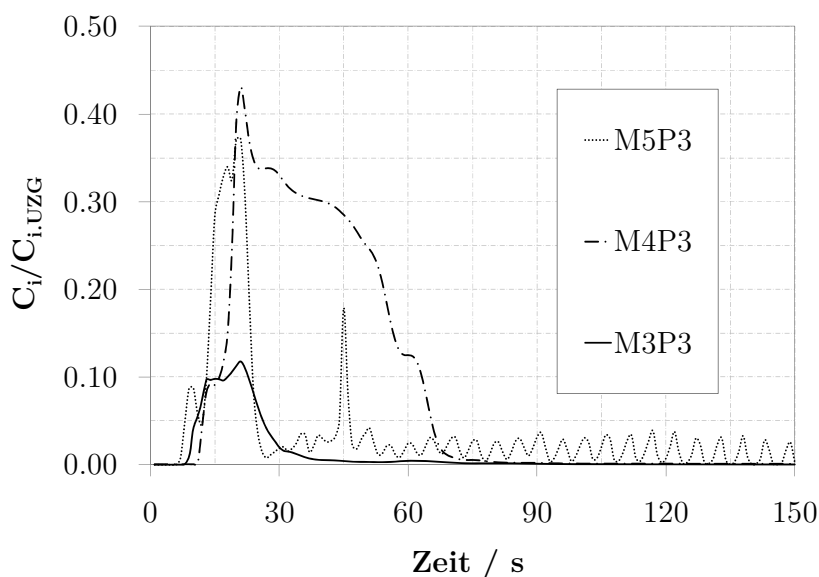


Abbildung 7-13: Vergleich der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ an verschiedenen Punkten in der Ebene E-L für das Szenario OS-1

In Abbildung 7-14 ist der räumliche Verlauf von $C_{i,UZG20\%}$ für einige ausgewählte Zeitschritte für OS-1 im relevanten Zeitraum von 0 ... 150 s in einer isometrischen 3D-Ansicht des Frachtraums dargestellt. Es ist jenes Volumen abgebildet, welches mindestens 20 % der UZG erreicht. Zu Beginn der Simulation ist kein Gefahrgutmassenstrom vorhanden. Der Masseneintritt ist nach ca. 10 s zunächst lokal begrenzt auf den Bereich des Gefahrguteinlasses (Fq, grau schattiert). Der Masseneintritt erreicht nach ca. 20 s sein Maximum.

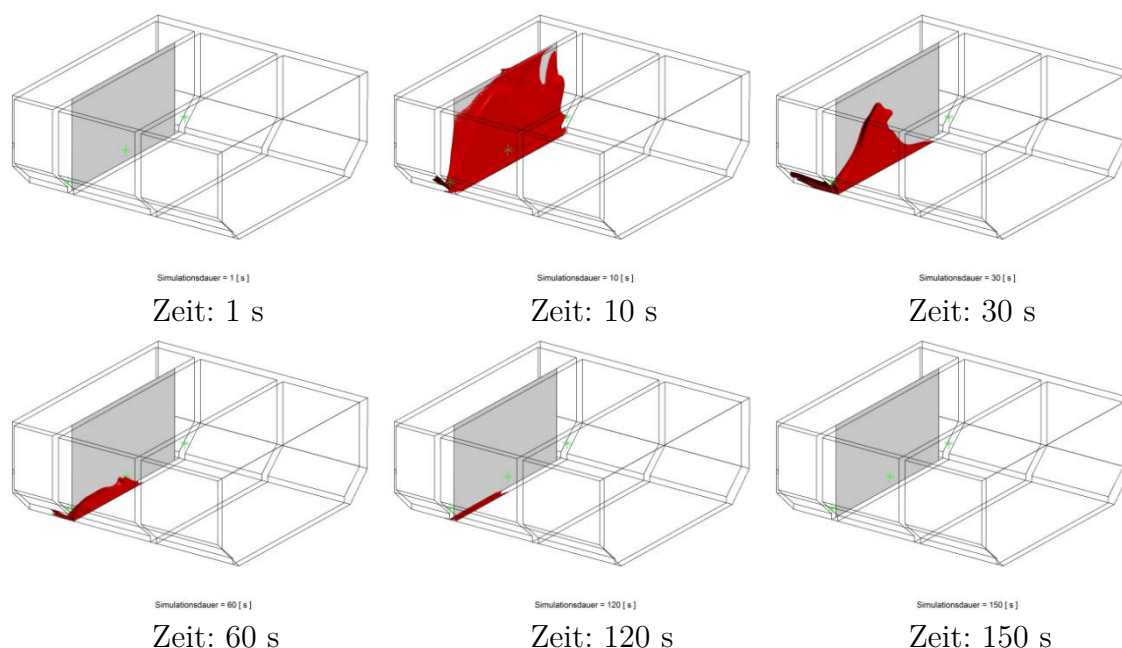


Abbildung 7-14: Vergleich von $C_{i,UZG20\%} \geq 20\%$ für das Szenario OS-1 im Zeitraum 1 ... 150 s

Nach 30 s ist der Masseneintritt bereits beendet, und das Gefahrgut wird in Richtung des Auslasses abtransportiert. Die Gefahrgutmenge nimmt dann im weiteren Verlauf der Simulation deutlich ab, es verbleiben jedoch geringe Mengen über einen längeren Zeitraum im Bodenbereich. Erst nach einer Simulationsdauer von ca. 120 s werden diese Reste von Gefahrgut abtransportiert. Nach 150 s ist kein Gefahrgut mehr vorhanden. Die Gefahrgutansammlung bleibt lokal begrenzt auf den Bereich des ersten Containerspaltes (Bereich der Ebene E-L).

Gefahrenpotential der Stoffausbreitung

In Abbildung 7-15 ist der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ und des normierten Volumens $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ über die Simulationsdauer von 150 s im Frachtraum dargestellt. Die Maximalwerte liegen für $C_i/C_{i.UZG}$ im Frachtraum bei über 200 % der UZG, diese wird im Szenario OS-1 also deutlich überschritten. Das dargestellte normierte Volumen $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ erreicht Werte von ca. 0,9 %, d.h. die Ausdehnung der Gefahrgutansammlung, welche 50 % der UZG überschreitet, nimmt ein Volumen von ca. 90 l ein.

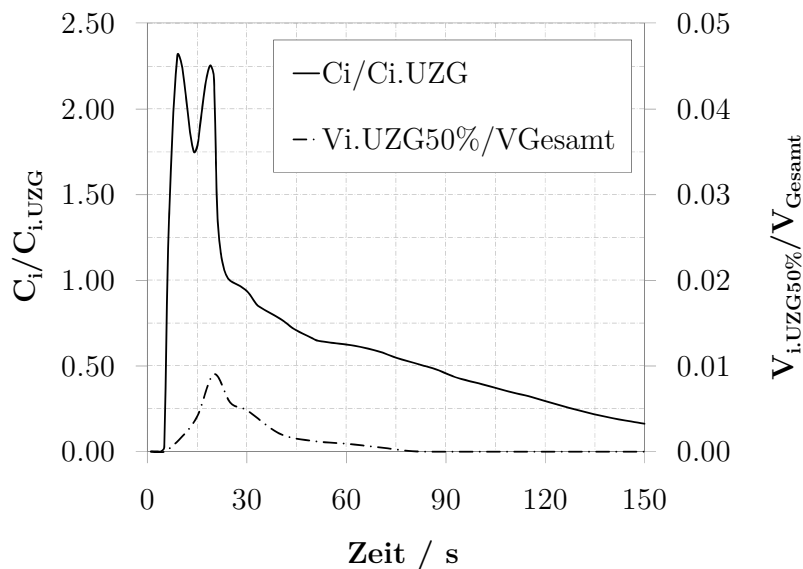


Abbildung 7-15: Darstellung von $C_i/C_{i.UZG}$ und von $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für OS-1

Die Ansammlung von Gefahrgut überschreitet die sicherheitsrelevante Grenze von 50 % der UZG deutlich. Die Ausdehnung des Gefahrguts bleibt dabei aber unter dem definierten Sicherheitskriterium von $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt} > 1,8 \%$. Daher ist im Szenario OS-1 von einer Gefährdung nicht auszugehen.

7.2.2 Szenario OS-3

Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Stoffausbreitung

In Abbildung 7-16 ist der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ im Szenario OS-3 über die Simulationsdauer von 150 s dargestellt. Abgebildet sind die Werte für die Positionen M3P3, M4P3 und M5P3. Gut erkennbar zeigt Abbildung 7-16 die in diesem Szenario deutlich erhöhten Konzentrationen im Zeitraum von ca. 5 ... 60 s. Der Austritt des Gefahrguts findet im Zeitraum von ca. 5 ... 20 s statt. Nach einer Simulationsdauer von ca. 60 s gehen die Konzentrationen auf geringere Werte zurück, verbleiben aber auf erhöhtem Niveau. Im mittleren Bereich des Frachtraums treten am Punkt M4P3 lokal etwas höhere Konzentrationen auf. Die Maximalwerte betragen hier ca. 56 % der UZG. Der Maximalwert für den gesamten Frachtraum liegt bei ca. 240 %.

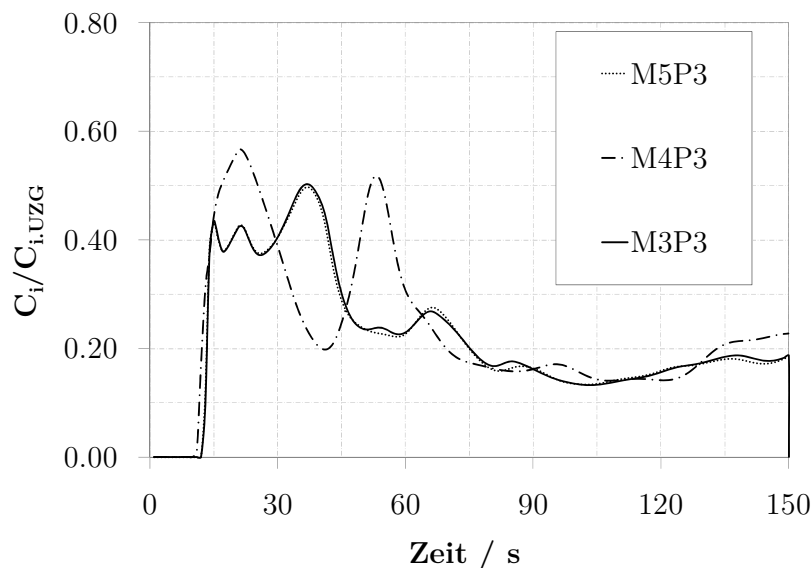


Abbildung 7-16: Vergleich der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ an verschiedenen Punkten in der Ebene E-L für das Szenario OS-3

In Abbildung 7-17 ist der räumliche Verlauf von $C_{i,UZG20\%}$ für sechs ausgewählte Zeitschritte des Szenarios OS-3 im relevanten Bereich von 0 ... 150 s in einer isometrischen 3D-Ansicht des Frachtraums dargestellt. Es ist jenes Volumen dargestellt, welches mindestens 20 % der UZG erreicht. Zu Beginn der Simulation ist kein Gefahrgutmassenstrom vorhanden. Der Masseneintritt beginnt nach ca. 6 s zunächst lokal begrenzt auf den Bereich des Gefahrguteinlasses (Fq, grau schattiert). Der Masseneintritt erreicht nach ca. 20 s sein Maximum. Die Gefahrgutmenge nimmt anschließend im weiteren Verlauf der Simulation wieder etwas ab, allerdings verbleiben weiterhin beträchtliche Mengen über den gesamten Simulationszeitraum im Frachtraum. Zum Ende der Simulationsdauer nach 150 s ist noch eine signifikante Ansammlung von Gefahrgut im gesamten Bodenbereich des Frachtraums vorhanden.

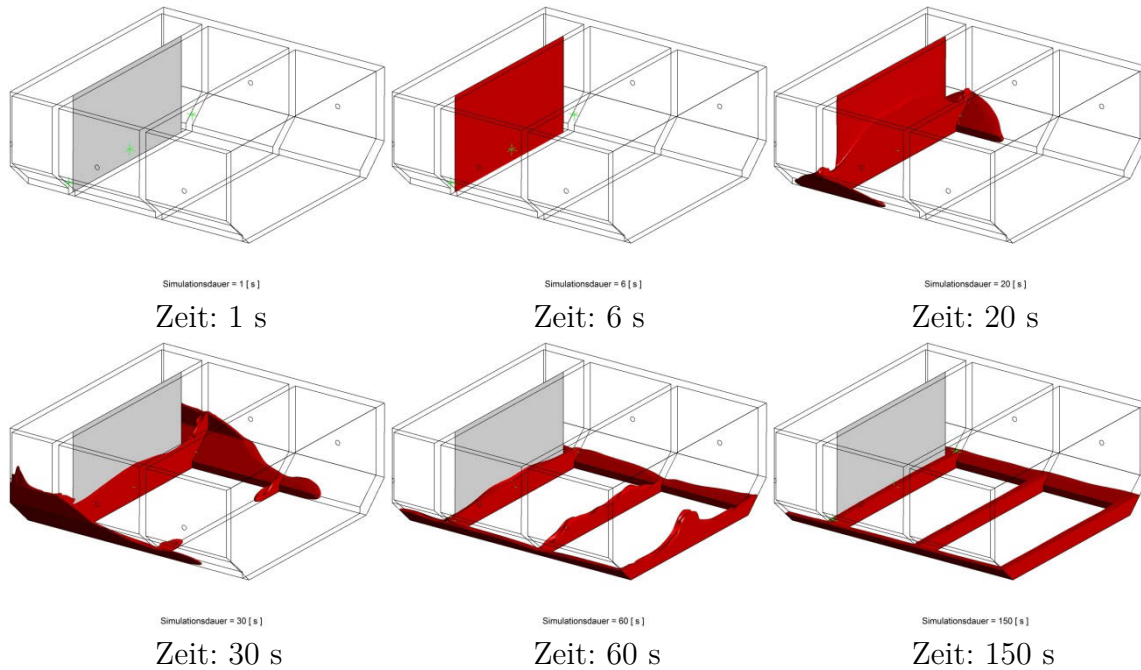


Abbildung 7-17: Vergleich von $C_{i.UZG20\%} \geq 20\%$ für das Szenario OS-3 im Zeitraum 1 ... 150 s

Gefahrenpotential der Stoffausbreitung

Der zeitliche Verlauf der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ und des normierten Volumens $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ über die Simulationsdauer von 150 s im Frachtraum ist in Abbildung 7-18 dargestellt. Wie gezeigt ergeben sich im Szenario OS-3 über den gesamten Zeitraum der Simulationsdauer erhöhte Gefahrgutkonzentrationen. Die Maximalwerte für $C_i/C_{i.UZG}$ im Frachtraum liegen auch in diesem Szenario bei über 200 % der UZG.

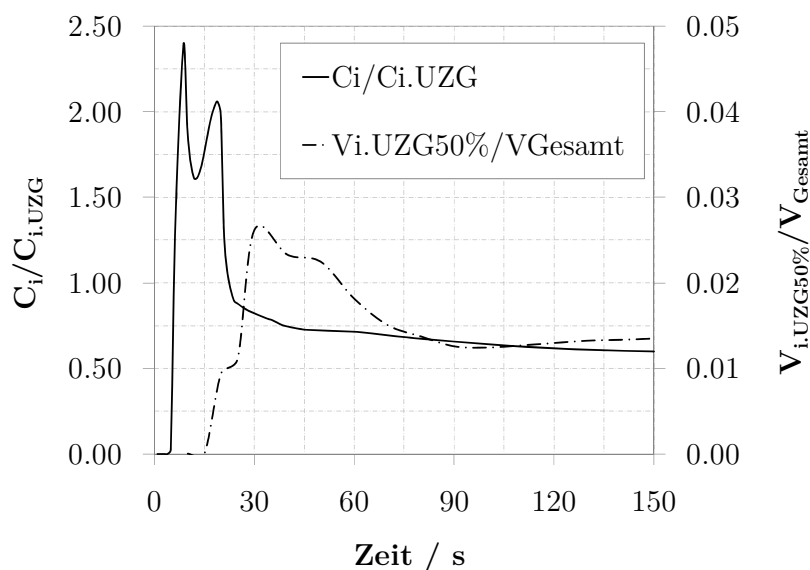


Abbildung 7-18: Darstellung von $C_i/C_{i.UZG}$ und von $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ für OS-3

Abbildung 7-18 verdeutlicht, dass die UZG wie in OS-1 auch in OS-3 überschritten wird. Die Ausdehnung der Gefahrgutansammlung, welche 50 % der UZG überschreitet, erreicht in OS-3 allerdings deutlich höhere Werte. Das normierte Volumen $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}$ erreicht Werte von ca. 2,5 %. Die Ansammlung von Gefahrgut überschreitet damit sowohl die sicherheitsrelevante Grenze von 50 % der UZG als auch $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt} > 1,8$ % deutlich. Das Szenario OS-3 ist aufgrund der klaren Überschreitung beider Sicherheitskriterien als gefährlich einzustufen.

7.2.3 Bewertung der Transport-Szenarien

Die in Abschnitt 7.1.5 genannten Grenzen und Annahmen für Szenarien im Modellmaßstab gelten auch für die Bewertung der Ergebnisse in den betrachteten Szenarien im Originalmaßstab. Insgesamt wird eine konservative Betrachtung angestrebt, indem für alle relevanten Aspekte eine möglichst ungünstige Annahme definiert wird.

Die beiden betrachteten Szenarien OS-1 (mit aktiver Frachtraumbelüftung) und OS-3 (ohne aktive Frachtraumbelüftung) sind im Rahmen der betrachteten Randbedingungen und Definitionen unterschiedlich zu beurteilen.

Das Szenario OS-1 mit aktiver Belüftung des Frachtraums und mit zeitlich begrenztem Gefahrgutmassenstrom ist aufgrund der auftretenden Gefahrgutmenge nicht als gefährlich einzustufen. Die Konzentrationswerte liegen zwar bei ca. dem doppelten Wert der UZG, die Gefahrgutausdehnung erreicht aber lediglich ca. die Hälfte des als gefährlich definierten Wertes.

Das Szenario OS-3, welches keine aktive Frachtraumbelüftung und einen zeitlich begrenzten Gefahrgutmassenstrom aufweist, führt zu kritischen Gefahrgutmengen im Frachtraum. Die berechneten Konzentrationswerte liegen ca. bei dem doppelten Wert der UZG. Die Ausdehnung der Gefahrgutansammlung erreicht Werte von ca. dem Anderthalbfachen des als gefährlich definierten Wertes.

7.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Die Simulation realitätsnaher Szenarien des Gefahrgutauftritts in den Flugzeugfrachtraum wird mittels des zuvor verwendeten generischen Modellfrachtraums im Maßstab 1/10 durchgeführt.
- Im Szenario MS-1 treten nur während der Phase des Gefahrguteintritts nennenswerte Konzentrationen im Frachtraum auf. Die globalen Maximalwerte der normierten Konzentration $C_i/C_{i,UZG}$ erreichen dabei ca. 35 % der UZG. Die Belüftung

des Frachtraums ist in der Lage, die Stoffansammlung wieder aus dem Frachtraum zu entfernen. Mit der Definition von $C_i/C_{i.UZG}=50\%$ als sicherer Abstand von der UZG sowie $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt} >1,8\%$ als kritisches Mindestvolumen von Gefahrgut ist im Fall des Szenarios MS-1 von einer Gefährdung nicht auszugehen, da keines der beiden Kriterien erfüllt wird.

- Im Szenario MS-2 treten erhöhte Konzentrationen über die gesamte Simulationsdauer auf. Die globalen normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ erreichen ca. 35 % der UZG. Die Belüftung des Frachtraums ist zwar nicht in der Lage, eine Stoffansammlung wieder aus dem Frachtraum zu entfernen, solange ein Gefahrgutmassenstrom anhält. Für das Szenario MS-2 ist aber von einer Gefährdung nicht auszugehen.
- Im Szenario MS-3 treten erhöhte Konzentrationen auch nach Beendigung des aktiven Gefahrgutmassenstroms nach 20 s bis zum Ende der Simulationsdauer auf. Die globalen Maximalwerte der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ erreichen im Frachtraum ca. 45 % der UZG. Da keine aktive Belüftung des Frachtraums vorhanden ist, wird die auftretende Stoffansammlung von Gefahrgut nicht aus dem Frachtraum ausgespült. Im Fall des Szenarios MS-3 ist aufgrund der Nähe der berechneten Konzentrationswerte zum Sicherheitsabstand von der UZG von einer Gefährdung auszugehen.
- Im Szenario MS-4 treten während der gesamten Simulation ab 5 s hohe Konzentrationen auf. Die globalen Maximalwerte der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ erreichen hohe Werte deutlich über 100 % der UZG, $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ erreicht 35 %. Da keine aktive Belüftung des Frachtraums vorhanden ist, wird die auftretende Stoffansammlung von Gefahrgut nicht aus dem Frachtraum ausgespült. Im Szenario MS-4 ist von einer Gefährdung auszugehen. Es werden beide Gefährdungskriterien während der Simulationszeit erfüllt. Aufgrund der deutlichen Überschreitung der UZG ist dieses Szenario als gefährlich einzustufen.
- Im Szenario OS-1 treten stark erhöhte Konzentrationen im ersten Drittel der Simulationsdauer und geringe Konzentrationen während fast der gesamten Simulationsdauer auf. Die globalen Maximalwerte der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ erreichen im Frachtraum ca. 225 % der UZG, $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ erreicht allerdings nur 0,9 %. Die Belüftung des Frachtraums ist in der Lage, die Gefahrgutansammlung vollständig aus dem Frachtraum zu entfernen. Da die berechnete Gefahrgutmenge deutlich unterhalb des Sicherheitskriteriums für die Gefahrgutausdehnung bleibt, ist dieses Szenario nicht als gefährlich einzustufen.
- Im Szenario OS-3 treten stark erhöhte Konzentrationen über der gesamten Simulationsdauer auf. Die Maximalwerte der Konzentrationen ergeben sich während des ersten Drittels der Simulationsdauer. Der globale Maximalwert der normierten Konzentration $C_i/C_{i.UZG}$ erreicht im Frachtraum ca. 240 % der UZG, $V_{i.UZG50\%}/V_{Gesamt}$ erreicht 2,5 %. Da der Frachtraum keine aktive Belüftung aufweist, wird die

auftretende Stoffansammlung von Gefahrgut aus dem Frachtraum nicht vollständig wieder ausgespült. Das Szenario OS-3 weist eine deutliche Überschreitung beider Sicherheitskriterien auf und ist somit das Szenario mit dem größten Gefahrenpotential.

8 Zusammenfassung

8.1 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Vor dem Hintergrund möglicher Gefahrenpotentiale beim Transport von Gefahrgut im Luftverkehr wird in der vorliegenden Arbeit anhand numerischer Simulationen die Stoffausbreitung in einem generischen Flugzeugfrachtraum untersucht. Der Einfluss relevanter Größen auf das Strömungsfeld und den Stofftransport im Frachtraum wird mittels einer systematischen Untersuchung quantifiziert und bewertet. Anhand von Transport-Szenarien wird der Stofftransport von Gefahrgut im Frachtraum im Modellmaßstab und im Originalmaßstab untersucht und das Gefahrenpotential der Szenarien bewertet.

Entwicklung eines numerischen Modells

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die Entwicklung eines geeigneten numerischen Modells. Die Abbildung der relevanten Merkmale typischer Flugzeugmuster führt zur Definition eines generischen Frachtraummodells. Der Einfluss verschiedener Varianten des verwendeten Rechengitters auf die numerische Lösung wird untersucht. Ein geeignetes Rechengitter wird ausgewählt und für die CFD-Simulationen verwendet. Die verwendeten Randbedingungen basieren auf realitätsnahen Werten aktueller Flugzeugmuster. Die Berechnung von Permeations- und Leckagemassenströmen kann auf Basis von Erkenntnissen aus vorangegangenen Untersuchungen der BAM erfolgen. Mittels der Definition einer Standard-Beladung mit Standard-Behältern werden die Eingangsdaten für die numerische Berechnung des Stofftransports im Frachtraum erzeugt.

Entwicklung eines geeigneten Modellaufbaus zur Validierung des numerischen Modells

Zur Validierung der numerischen Berechnungen werden im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Modellversuche durchgeführt. Modellversuche stellen in diesem Fall das Mittel der Wahl dar, um den Kosten- und Zeitaufwand in Grenzen zu halten. Die Eignung der Modellversuche wird vor dem Hintergrund der Ähnlichkeitsproblematik diskutiert. Die Validierungsuntersuchungen werden ebenso wie die CFD-Simulationen im skalierten Modellmaßstab 1/10 durchgeführt, wodurch eine geometrische und strömungsmechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und Experiment gegeben ist. Das validierte numerische Modell wird zudem für CFD-Simulationen im Originalmaßstab verwendet, da die dem numerischen Modell zugrundeliegenden Gleichungen skalenunabhängig gelten. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der CFD-Untersuchungen im Originalmaßstab zu jenen im Modellmaßstab bestätigt die Vorgehensweise.

Validierung der numerischen Untersuchungen mittels LDA-Messungen

Ein Frachtraum-Modell im Maßstab 1/10 wird an der BAM konstruiert, gefertigt und aufgebaut. Mittels eines kommerziellen 1D-LDA-Systems wird das Strömungsfeld im Modellfrachtraum vermessen und das verwendete numerische Modell validiert. Anhand von drei Validierungskriterien (Symmetrie, Verläufe und Beträge der betrachteten Strömungsgrößen, LDA-Spektralanalyse) wird insgesamt eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation ermittelt. Die größten Abweichungen ergeben sich in gering turbulenten Bereichen aufgrund der Turbulenzmodellierung bei CFD-Simulationen.

Untersuchung der relevanten Einflussgrößen

Die Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Frachtraum werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Anhand einer systematischen Untersuchung werden der Einlass- und Wandeinfluss und der Einfluss verschiedener Konfigurationen auf das Strömungsfeld und den Stofftransport bewertet. Der Einfluss der Einlassreynoldszahl auf das Strömungsfeld erweist sich als gering, die Einlassreynoldszahl zeigt aber einen deutlichen Einfluss auf den Stofftransport. Dabei führen kleine Reynoldszahlen ($Re=2.570$) zu hohen Massenanteilen bzw. Konzentrationen und größere Reynoldszahlen ($Re=10.280$) zu deutlich geringeren Werten. Der Turbulenzgrad am Einlass zeigt nur einen geringen Einfluss auf das Strömungsfeld und den Stofftransport im untersuchten Modellfrachtraum. Der Einfluss der Wandrauigkeit weist eine geringfügige quantitative Verzögerung der Geschwindigkeiten bei wachsender Wandrauigkeit auf. Wandunebenheiten führen nur lokal zu Beschleunigungs- und Verzögerungseffekten. Die Variation des Einlassmassenstromverhältnisses zeigt erst für Werte von $\alpha < 1000$ einen signifikanten Einfluss sowohl auf den Stofftransport als auch auf das Strömungsfeld. Die definierte Standard-Beladung ist gut geeignet, realitätsnahe Massenstromverhältnisse abzubilden. Die Ergebnisse der Bewertung von Gasen verschiedener Dichten bestätigen die Erwartung, dass sich leichte Gase im oberen Bereich und schwere Stoffe im unteren Bereich des Frachtraums ausbreiten. Die in dieser Arbeit betrachteten Stoffe Toluol und n-Hexan mit Dämpfen schwerer als Luft bilden das typische Ausbreitungsverhalten von brennbaren Gefahrgütern der Klasse 3 gut ab. Die Bewertung vier verschiedener realitätsnaher Gefahrgutquellen zeigt deutliche Unterschiede in der Gefahrgutausbreitung. Die global höchsten Massenanteile von Gefahrgut ergeben sich für eine mittig angeordnete Spaltquelle und eine flächige Einlassquelle, eine in der Nähe des Auslass positionierte Spaltquelle führt global zu den geringsten Massenanteilen. Lokal ist der Einfluss des Quelltyps von der betrachteten Position abhängig und ermöglicht keine allgemeingültige Beurteilung.

Numerische Simulation der Strömungs- und Stofftransportvorgänge in Transport-Szenarien

Anhand vier verschiedener Szenarien wird die Ausbreitung von Gefahrgut im Modellmaßstab untersucht. Die Szenarien unterscheiden sich durch die Belüftung

(aktive Belüftung / keine aktive Belüftung) und durch die Dauer des Gefahrgutaustritts in den Frachtraum (zeitlich begrenzt / zeitlich nicht begrenzt). Die beiden Szenarien mit aktiver Frachtraumbelüftung sind bezüglich der Brand- und Explosionsgefahr der Gefahrgutansammlungen als eher unkritisch zu beurteilen. Es treten zwar deutlich erkennbar Gefahrgutansammlungen auf, diese werden aber durch die vorhandene Strömung im Frachtraum entfernt. Es werden Gefahrgutansammlungen ermittelt, die maximal ca. 35 % der unteren Zündgrenze (UZG) erreichen. Je länger ein aktiver Gefahrgutmassenstrom andauert, umso weniger ist eine aktive Belüftung in der Lage, die Gefahrgutansammlung aus dem Frachtraum zu entfernen. Die beiden Szenarien ohne aktive Frachtraumbelüftung sind als gefährlich einzustufen. Bereits das Szenario mit zeitlich begrenztem Gefahrgutmassenstrom ist aufgrund der auftretenden Konzentrationswerte von 45 % der UZG als problematisch einzustufen, auch wenn die Gefahrgutansammlung nicht den definierten Grenzwert erreicht. Das Szenario mit zeitlich unbegrenztem Gefahrgutmassenstrom erreicht mit ca. 185 % der UZG kritische Konzentrationswerte und mit $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}=35\%$ eine kritische Ausdehnung der Gefahrgutansammlung im Frachtraum.

Anhand von zwei verschiedenen Szenarien werden die im Modellmaßstab gewonnenen Erkenntnisse für den Fall der Gefahrgutausbreitung im Originalmaßstab überprüft. Die Szenarien im Originalmaßstab basieren auf den Szenarien im Modellmaßstab und unterscheiden sich durch die Belüftung und durch die Dauer des Gefahrgutaustritts in den Frachtraum voneinander. Im Szenario mit aktiver Belüftung werden Gefahrgutkonzentrationen ermittelt, die über der UZG liegen ($C_i/C_{i,UZG}=225\%$), wobei die Gefahrgutausdehnung nur ca. ein Drittel des kritischen Wertes erreicht ($V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}=0,9\%$). Dieses Szenario ist nicht als gefährlich einzustufen. Im Szenario ohne aktive Frachtraumbelüftung erreichen die Gefahrgutkonzentrationen ebenfalls einen Wert deutlich über der UZG ($C_i/C_{i,UZG}=240\%$), zudem überschreitet die Gefahrgutausdehnung den kritischen Wert und erreicht $V_{i,UZG50\%}/V_{Gesamt}=2,5\%$. Dieses Szenario weist damit eine deutliche Überschreitung beider Sicherheitskriterien auf und ist daher als gefährlich zu bewerten.

8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag, das Verständnis der Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Flugzeugfrachtraum vor dem Hintergrund potentieller Brand- und Explosionsrisiken beim Transport von Gefahrgütern im Luftverkehr zu erweitern. Dieses Verständnis kann in Zukunft dazu genutzt werden, Risiken im Luftverkehr zu identifizieren und zu minimieren. Um jedoch die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sinnvoll zu nutzen, sind die Allgemeingültigkeit und die

Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf andere Flugzeugmuster und Flugszenarien zu überprüfen.

Die vorliegende Arbeit wird anhand eines geometrisch einfachen numerischen Frachtraummodells durchgeführt. Das Ziel ist hierbei nicht eine möglichst hohe Detailtreue in der Nachbildung, sondern die Abbildung typischer Merkmale aktueller Flugzeugtypen. Für die Erarbeitung von Grundlagen und einer Einschätzung der prinzipiellen Vorgänge im Flugzeugfrachtraum ist das verwendete numerische Modell geeignet. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf spezifische Flugzeugmuster mit komplexeren Details ist zu prüfen. Für weitere Untersuchungen ist daher die Betrachtung zusätzlicher Aspekte empfehlenswert:

- Die spezifischen Details der Frachtraumgeometrie inklusive eventuell vorhandener Toträume im Strömungsgebiet können das Strömungsfeld und den Stofftransport beeinflussen.
- Die hier beschriebenen Erkenntnisse werden anhand von zwei Belüftungsfällen erarbeitet. Eine Untersuchung weiterer Belüftungsmodi und der daraus resultierenden Strömungsfelder unterschiedlicher Turbulenzgrade erscheint für weitere Studien sinnvoll.
- In dieser Arbeit wird weiterhin der Einfluss der Einlassrandbedingung diskutiert. Die Abbildung komplexer Einlassgeometrien oder der daraus resultierenden Einlassrandbedingungen wie beispielsweise der Einlassgeschwindigkeitsprofile und der Einlassturbulenzparameter sollten in einem zukünftigen numerischen Modell Verwendung finden.
- Die Auswirkung verschiedener Gefahrgüter auf den Stofftransport ist für die vorliegende Thematik von Interesse. Der Einfluss der Stoffdichte wird hier dargestellt. Die detaillierte Untersuchung des Einflusses weiterer Stoffparameter ist empfehlenswert.
- Im Rahmen dieser Arbeit werden vier generische Szenarien verwendet. In zukünftigen Untersuchungen sollten weitere Flugszenarien berücksichtigt werden, wobei insbesondere die Simulation längerer Flugzeiten sinnvoll ist.
- Der Wärmeübergang in den Frachtraum wird in der hier beschriebenen Untersuchung nicht berücksichtigt. Die Betrachtungen werden für den isothermen Fall durchgeführt. Die Berücksichtigung des Wärmeübergangs aufgrund von Avioniksystemen, Elektrik, heißluftführender Belüftungskanäle, Sonneneinstrahlung, Frachtraumisolierungen usw. erscheint sinnvoll, da dieser das Strömungsfeld aufgrund von Auftriebseffekten beeinflussen kann.

Literaturverzeichnis

- [1] POMPL, W.: *Luftverkehr*. Springer Verlag, Berlin, 2007
- [2] BERSTER, P. ET AL: *Luftverkehrsbericht 2011*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012
- [3] LUFTHANSA CARGO AG: *Gefahrgutjahresbericht 2009*. Lufthansa Cargo AG, Frankfurt, 2009
- [4] WINDER, C.; MICHAELIS, S. ; HOCKING, M. (Hrsg.): *Crew Effects from Toxic Exposures on Aircraft (in: The Handbook of Environmental Chemistry)*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005
- [5] KÖRNER, U: *Leitfaden zur Beurteilung mangelbehafteter Versandstücke im Luftverkehr*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2005
- [6] GOEDECKE, T.: Performance and frequency of leakproofness tests for dangerous goods packagings. In: *Proceedings of the 14th IAPRI World Conference on Packaging* (2004)
- [7] BMVBS BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR)*. 2011
- [8] OTREMBA, F.; GOEDECKE, T.: Ermittlung explosionsfähiger Gemische beim Gefahrguttransport unter normalen Beförderungsbedingungen. In: *Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten : 40 Jahre GUS 19* (2009), S. 227–237
- [9] GOEDECKE, T.; BETHKE, J.; KRAUS, W.: *Permeation beim Gefahrguttransport im Container. Ermittlung explosionsfähiger Gemische beim Gefahrguttransport im Container unter normalen Beförderungsbedingungen*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt 3140 des BMVBS. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 2007
- [10] KRAUS, W.; GOEDECKE, T.; JAHNKE, W.: *Permeation von Gefahrgütern aus Verpackungen*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt 3141 des BMVBS. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 2010
- [11] HARGATHER, M.J. ; STAYMATES, M.E. ; MADALIS, M.J. ; SMITH, D.J. ; SETTLES, G.S.: The Internal Aerodynamics of Cargo Containers for Trace Chemical Sampling and Detection. In: *Sensors Journal, IEEE* 11 (2011), Nr. 5, S. 1184–1193
- [12] SMITH, D.J.: *Study of the induced airflow inside air-cargo containers and methods to sample the air for chemical trace detection*. Pennsylvania Park, PA, USA, Pennsylvania State University, Diplomarbeit, 2005
- [13] OBERKAMPF, W; TRUCANO, T.: Verification and validation in computational fluid dynamics. In: *Progress in Aerospace Sciences* 38 (2002), Nr. 3, S. 209–272
- [14] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD: *Aircraft Accident Report NTSB/AAR-98-03: Federal Express Accident, Newburgh, New York, Federal*

- Express Flight 1406, September 5, 1996.* 1998 <http://libraryonline.erau.edu/-online-full-text/ntsb/aircraft-accident-reports/AAR98-03.pdf>. Abgerufen am 24.6.2014
- [15] GENERAL CIVIL AVIATION AUTHORITY OF THE UNITED ARAB EMIRATES: *Air Accident Investigation Interim Report - Boeing 747-44AF, N571UP, Dubai, United Arab Emirates, September 03 2010.* 2010 <http://www.gcaa.gov.ae/en/-ePublication/admin/iradmin/Lists/Incidents%20Investigation%20Reports/-Attachments/16/2010-Interim%20Report%20B747-400F%20-%20N571UP%20-%20Report%2013%202010%20-%20Rev%201.pdf>. Abgerufen am 24.6.2014
- [16] BOARD OF INQUIRY, REPUBLIC OF SOUTH AFRICA: *Report of the Board of Inquiry into the Helderberg Air Disaster.* 1990 <http://www.caa.co.za/resource%20center/-accidents%20&%20incid/reports/OldReports/Final%20Report%20ZS-SAS.pdf>. Abgerufen am 24.6.2014
- [17] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD: *Safety Recommendation A-11-68 and -69 - Lufthansa Cargo Accident at Riad, Flight 8460, July 27, 2010.* 2011 <http://www.nts.gov/doclib/recletters/2011/a-11-068-069.pdf>. Abgerufen am 24.6.2014
- [18] CHEN, Q: Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. In: *Building and Environment* 44 (2010), S. 848–858
- [19] CHEN, Q.; LEE, K. MAZUMDAR, S.; POUSSOU; ET AL: Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment. In: *Building and Environment* 44 (2010), S. 848–858.
- [20] BAKER, S.C.; Orzechowski J.A.; W. A.J.; Ericson E. A.J.; Ericson: Aircraft Passenger Cabin ECS-Generated Ventilation Velocity and Mass Transport CFD Simulation. In: *Journal of the IEST* 49 (2006), S. 51–83
- [21] GUPTA, J.; LIN, C-H.; CHEN, Q.: Prediction of Spatial and Temporal Distribution of Expiratory Droplets in an Aircraft Cabin. In: *International High Performance Buildings Conference Paper* 56 (2010)
- [22] YAN, W.; ZHANG, Y.; SUN, Y.; LI, D.: Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. In: *Building and Environment* 44 (2009), Nr. 1, S. 34–43
- [23] YIN, S.; ZHANG, T.: A new under-aisle displacement air distribution system for wide-body aircraft cabins. In: *Building Simulation 2009* (2009), S. 1030–1036
- [24] BIANCO, V. ; MANCA, M. ; NARDINI, S. ; ROMA, M.: Numerical investigation of transient thermal and fluidynamic fields in an executive aircraft cabin. In: *Applied Thermal Engineering* 29 (2009), Nr. 16, S. 3418–3425
- [25] ZHANG, T ; CHEN, Q: Comparison Of Different Ventilation Systems For Commercial Aircraft Cabins. In: *Indoor Air* 4 (2005), S. 3205–3210
- [26] ZHANG, Z. ; CHEN, X. ; MAZUMDAR, S. ; ZHANG, T. ; CHEN, Q.: Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup. In: *Building and Environment* 44 (2009), Nr. 1, S. 85–94

- [27] ZHAI, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, W.; CHEN, Q.: Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1 – Summary of Prevalent Turbulence Models. In: *HVAC&R Research* 13 (2007), S. 853–870
- [28] ZHANG, Z.; ZHANG, W.; ZHAI, Z.; CHEN, Q.: Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2 – Comparison with Experimental Data from Literature. In: *HVAC&R Research* 13 (2007), S. 871–886
- [29] LIEN, F.; LESCHZNER, M.: Low-Reynolds-number eddy viscosity modelling based on non-linear stress-strain/vorticity relations. In: *Engineering Turbulence Modelling and Experiments* 3 3 (1996), S. 91–100
- [30] BOSBACH, J. ; PENNECOT, J. ; WAGNER, C. ; RAFFEL, M. ; LERCHE, T. ; REPP, S.: Experimental and numerical simulations of turbulent ventilation in aircraft cabins. In: *Energy* 31 (2006), Nr. 5, S. 694–705
- [31] GÜNTHER, G; BOSBACH, J; PENNECOT, J; WAGNER, C; LERCHE, T; GORES, I: Experimental and numerical simulations of idealized aircraft cabin flows. In: *Aerospace Science and Technology* 10 (2006), Nr. 7, S. 563–573
- [32] WANG, M.: *Modeling Airflow and Contaminant Transport in Enclosed Environments with Advanced Models*, Purdue University, Diss., 2011
- [33] ANSYS INC.: *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Canonsbury, PA, USA, 2011
- [34] YU, H; LIAO, H-M; CHIANG, K-C: Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: Non-isothermal condition. In: *Building and Environment* 42 (2007), S. 1142–1150
- [35] MORSING, S; STRØM, JS; ZHANG, G; KAI, P: Scale model experiments to determine the effects of internal airflow and floor design on gaseous emissions from animal houses. In: *Biosystems Engineering* 99 (2008), S. 99–104
- [36] PFISTER, S.; VELA, I; KNAUST, C.; KRAUS, U.: Untersuchung der Brandszenarien in Industrieanlagen mit numerischer Strömungssimulation. In: *12. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik* (2010), S. 55–59. – ISBN: 978-3-9813550-1-7
- [37] PFISTER, S.: *Grundlagen für die Anwendung numerischer Strömungssimulationen auf Brandszenarien in Industrieanlagen*, Technische Universität Berlin, BAM Dissertationsreihe, 2013
- [38] POUSSOU, S.; MAZDUMAR, S.; PLESNIAK, M.; SOJKA, P.; CHEN, Q.: Flow and contaminant transport in an airliner cabin induced by a moving body: Model experiments and CFD predictions. In: *Atmospheric Environment* 44 (2010), S. 2830–2839
- [39] THATCHER, T. L. ; WILSON, D. J.; WOOD, E. E.; CRAIG, M. J.; SEXTRO, R. G.: Pollutant dispersion in a large indoor space: Part 1 – Scaled experiments using a water-filled Model with occupants and furniture. In: *Indoor Air* 14 (2004), S. 258–271

- [40] FINLAYSON, E. U. ; GADGIL, A. J.; THATCHER, T. L.; SEXTRO, R. G.: Pollutant dispersion in a large indoor space. Part 2: Computational fluid dynamics predictions and comparison with a scale model experiment for isothermal flow. In: *Indoor Air* 14 (2004), S. 272–283
- [41] ICAO INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air*. Montreal, 2009
- [42] IATA INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Dangerous Goods Regulations*. Montreal, 2009
- [43] BMJ BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz GGBefG)*. <http://bundesrecht.juris.de/-bundesrecht/gefahrgutg/gesamt.pdf>. Abgerufen am 24.6.2014
- [44] BMJ BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung GefStoffV)*. http://www.gesetze-im-internet.de/-bundesrecht/gefstoffv_2010/gesamt.pdf. Abgerufen am 24.6.2014
- [45] KHATOUN, A.: *Untersuchung der Permeation spezieller Lösemittel durch Gefahrgutverpackungen aus Kunststoff*, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Diplomarbeit, 2006
- [46] HUNT, E. H.; SPACE, D. R.: The airplane cabin environment. In: *Aerospace Medical Association annual meeting, Anaheim, California*. (1995)
- [47] BEZOLD, A.: Environmental Control Systems. In: *ICE International Aviation Conference, München* (2009)
- [48] COMMITTEE ON AIRLINER CABIN AIR QUALITY, NATIONAL RESEARCH COUNCIL: *The Airliner Cabin Environment: Air Quality and Safety*. ISBN 978-0-309-07363-9 : National Research Council, 1986
- [49] DECHOW, M.; NURCOMBE, C.A.H.: *Environmental Control Systems*. Springer Verlag, Berlin, 2005
- [50] WÖRNER, M.: *Wärme- und Stofftransport in einer Flugzeugkabine unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtetransportes*, Universität Hamburg-Harburg, Diss., 2006
- [51] EASA EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25*. <http://easa.europa.eu/agency-measures/certification-specifications.php#CS-25>. Abgerufen am 24.6.2014
- [52] VDI: *Hygiene-Anforderungen an die Lüftungstechnik in Fahrzeugen zur Personenbeförderung*. Düsseldorf, 2004
- [53] DOMININGHAUS, H.; EYERER, P.: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Springer Verlag, Berlin, 2005
- [54] BAEHR, H.D.; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Verlag, Berlin, 2008
- [55] ORZINSKI, M.: *Untersuchung der Permeation von anorganischen Gasen und organischen Verbindungen durch barriereverbesserte Kunststoffflaschen und ihre messtechnische Erfassung*, Technische Universität Berlin, Diss., 2007
- [56] CRANK, J.: *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford, 1975

- [57] HERWIG, H.: *Strömungsmechanik*. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [58] CARLOWITZ, B.: *Die Kunststoffe: Chemie, Physik, Technologie*. Hanser Verlag, München, 1990
- [59] CHEN, S.P.; EDIN, J.A.D.: Fickian Diffusion of Alkalines Through Glassy Polymers: Effects of Temperature, Diffusion and Size and Polymer Structure. In: *Polymer Engineering and Science* 20 (1980)
- [60] MÜLLER, K.: *O₂-Durchlässigkeit von Kunststoffflaschen und Verschlüssen - Messung und Modellierung der Stofftransportvorgänge*, Technische Universität München, Diss., 2003
- [61] MASSEY, L.K.: *Permeability properties of plastics and elastomers: a guide to packaging and barrier materials*. William Andrew Publishing Plastics Design Library, New York, 2003
- [62] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 1972-2: Kunststoffe – Polyethylen (PE)-Formmassen – Teil 2: Herstellung von Probekörpern und Bestimmung von Eigenschaften*. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [63] FRANKEN, C.M.: *Messtechnische Ermittlung des Schwindungsverhaltens von Kunststoffen*, Fachhochschule Aachen, Diplomarbeit, 2012
- [64] FAYOUX, S.C.; SEUVRE, A.-M.; VOILLEY, A.J.: Aroma Transfers in and through Plastic Packagings: Orange Juice and d-Limonene. A Review. In: *Packaging Technology and Science* 10 (1997)
- [65] PIRINGER, O.: *Plastic Packaging Materials for Food. Barrier Function, Mass Transport, Quality Assurance and Legislation*. Wiley VCH, Weinheim, 2000
- [66] UMRATH, W.: *Grundlagen der Vakuumtechnik*. Leybold Vakuum GmbH, Köln, 2002
- [67] HABIB, A.: *Instationäre Berechnung der Lachenverdunstung mittels eines Grenzschichtverfahrens*, Technische Universität Berlin, BAM Dissertationsreihe, 2011
- [68] BAEHR, H-D.: *Thermodynamik*. Springer Verlag, Berlin, 2002
- [69] TECHNISCHE REGEL BGR 104: *Explosionsschutz-Regeln - Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung*. Fachausschuss Chemie der BGZ, 2007
- [70] JOOS, F.: *Technische Verbrennung*. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [71] PAWEL, D.; BRANDES, E.: *Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 1998
- [72] INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (IFA): *GESTIS-Stoffdatenbank*. <http://www.dguv.de/-dguv/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp>. – Abgerufen am 24.06.2014
- [73] DGZFP: *Richtlinie DP 2: Richtlinie zur Umrechnung der mit Prüfgasen gemessenen Leckageraten in andere Medien (Gase, Flüssigkeiten)*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Berlin, 2009

- [74] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 4118-2005: Air cargo - Non-certified containers for the lower deck of large-capacity aircraft - Specification and testing*. Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [75] LUFTHANSA CARGO AG: *Technische und verfahrensrechtliche Richtlinien für vorgebaute Einheiten*, 2013. http://lufthansa-cargo.com/fileadmin/user_upload/-corporate_2013/pdf/Infothek/BUP-Richtlinien_2013_09.pdf. Abgerufen am 24.6.2014
- [76] AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS: *AIAA-G-077-1998: Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations*. 1998
- [77] FERZIGER, J.; PERIC, M.: *Numerische Strömungsmechanik*. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [78] SCHLICHTING, H; GERSTEN, K.: *Grenzschicht-Theorie*. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [79] ANSYS INC.: *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsbury, PA, USA, 2011
- [80] NIEUWSTADT, F.T.M.: Direct and Large-Eddy Simulation of Free Convection. In: *Proceedings of the 9th International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel 1* (1990), S. 37–47
- [81] LOOMANS, M.: *The Measurement and Simulation of Indoor Air Flow*, Technische Universität Eindhoven, Diss., 1998
- [82] MONIN, A.S.; YAGLOM, A.M.: *Statistical Fluid Mechanics: The Mechanics of Turbulence*. Stanford University Report, Stanford, 1971
- [83] LAURIEN, E.; OERTEL, H.: *Numerische Strömungsmechanik*. Vieweg und Teubner, Braunschweig, 2003
- [84] YAKHOT, V.; ORSZAG, S.: Renormalization Group Analysis of Turbulence. In: *Journal of Scientific Computing 1* (1986)
- [85] LAUNDER, B.; SPALDING, D.: The numerical simulation of turbulent flows. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy 3* (1974), S. 269–289
- [86] DEWAN, A.: *Tackling Turbulent Flows in Engineering*. Springer Verlag, Berlin, 2011
- [87] MENTER, F.; KUTZ, M.; LANGTRY, R.: Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. In: *AIAA Journal 32* (1994), S. 1598–1605
- [88] MENTER, F.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R.: Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In: *Turbulence, heat and mass transfer 4* (2003)
- [89] WILCOX, D.C.; ALBER, I.: A turbulence model for high speed flows. In: *Proceedings of the 1972 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute* (1972)
- [90] WANG, A.; ZHANG, Y.; SUN, Y.; WANG, X.: Experimental study of ventilation effectiveness and air velocity distribution in an aircraft cabin mockup. In: *Building and Environment 43* (2008), S. 337–343
- [91] BENDER, J.: *Laseroptische Strömungsfelduntersuchungen in engen Luftkanälen*, Technische Universität Berlin, Diss., 2004
- [92] SIGLOCH, H.: *Technische Fluidmechanik*. Springer Verlag, Berlin, 2007

- [93] SONIN, A.: *The Physical Basis of Dimensional Analysis*. 2nd Edition. Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge, USA, 2001
- [94] MÜLLEJANS, H.: *Über die Ähnlichkeit der nichtisothermen Strömung und den Wärmeübergang in Räumen mit Strahl Lüftung*, RWTH Aachen, Diss., 1966
- [95] NIELSEN, P.V.: *Flow in Air Conditioned Rooms - Model Experiments and Numerical Solution of the Flow Equations*, Technical University of Denmark, Diss., 1974
- [96] NIELSEN, P.V.: *Lecture Notes on Scale Model Experiments*. Aalborg University, Indoor Environmental Engineering, 1999
- [97] NIELSEN, P.V.: Model Experiments for the Determination of Airflow in Large Spaces. In: *Proceedings of the 6th International Conference in Indoor Air Quality, Indoor Air 1993*. – Helsinki, Finland, 1993
- [98] LEDER, A. ; RUCK, B. (Hrsg.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. AT-Fachverlag, Stuttgart, 1990
- [99] LEDER, A.: *Abgelöste Strömungen*. Vieweg und Teubner, Braunschweig, 1992
- [100] ZHANG, Z.: *LDA application methods: laser Doppler anemometry for fluid dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, 2010
- [101] DANTEC DYNAMICS A/S: *65X64-67 Flowlite High Power*. Skovlunde, Denmark, 2002
- [102] DANTEC DYNAMICS A/S: *BSA Flow Software Users Guide*. Skovlunde, Denmark, 2012
- [103] AWBI, H. B.: *Ventilation of Buildings*. E&FN Spohn, London, 2003
- [104] RIETSCHEL, H.: *Raumklimatechnik. Band 1: Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg, 1994
- [105] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG: *Abschlussbericht zum BMVBS-Forschungsprojekt "Permeation von Gefahrgütern aus Verpackungen"*. – BAM-Projektnummer Vh 3141, Berlin, 2010
- [106] SREBRIC, J.: *Simplified Methodology for Indoor Environment Design*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2000
- [107] SREBRIC, J.; CHEN, Q.: Simplified Numerical Models for Complex Air Supply Diffusers. In: *HVAC&R Research* 8 (2002), S. 277–294
- [108] NIELSEN, P.V.: Representation of Boundary Conditions at Supply Openings. In: *IEA Annex 20, Research Item 1.11* (1989)
- [109] NIELSEN, P.V.: *The Box Method - A practical Procedure for Introduction of an Air Terminal Device in CFD Calculation*. Aalborg University, Indoor Environmental Engineering, 1997
- [110] FONTAINE, J.R.; RAPP, R.; KOSKELA, H.; NIEMELA, R.: Evaluation of air diffuser flow modelling methods experiments and computational fluid dynamics simulations. In: *Building and Environment* 40 (2005), S. 377–389
- [111] ZHANG, T. T.; LEE, K.; CHEN, Q. Y.: A simplified approach to describe complex diffusers in displacement ventilation for CFD simulations. In: *Indoor Air* 19 (2009), S. 255–267

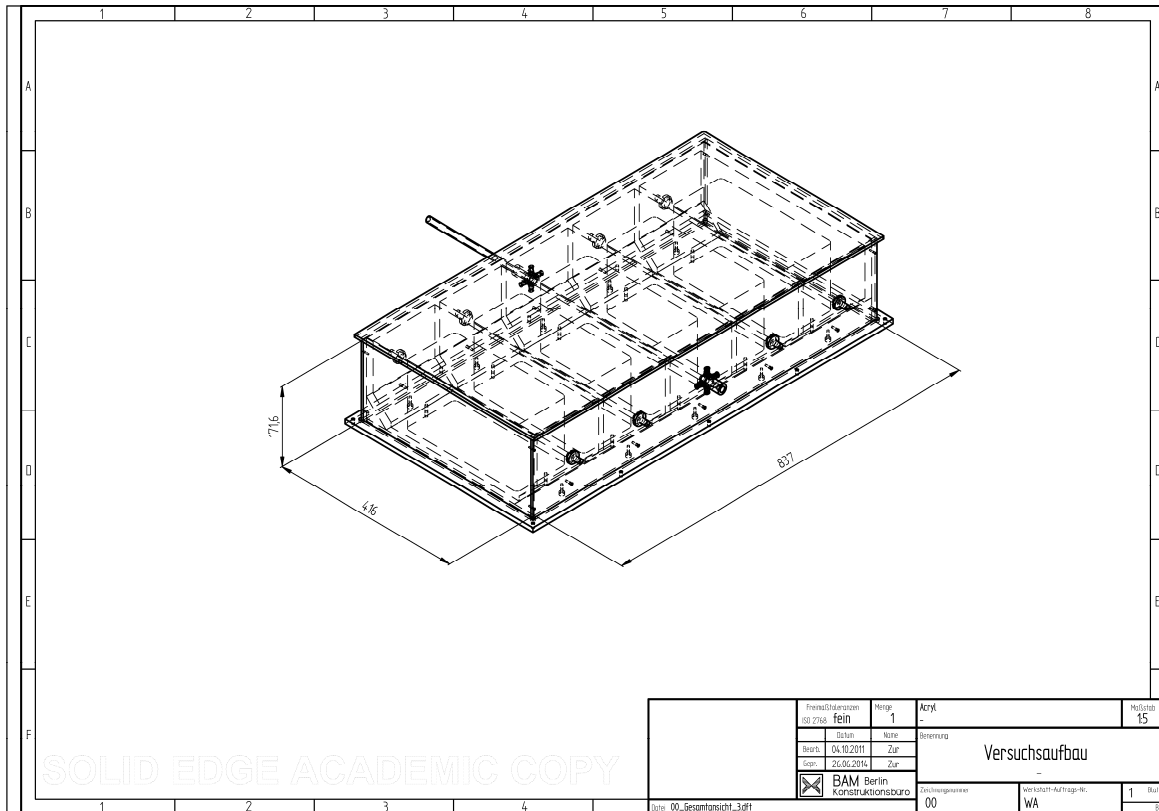
- [112] DJUNAEDY, E; CHEONG, K.W.D: Development of a simplified technique of modelling four-way ceiling air supply diffuser. In: *Building and Environment* 37 (2002)
- [113] ANSYS INC.: *ANSYS ICEM CFD 14.0 User Manual*. Canonsbury, PA, USA, 2011
- [114] LECHELER, S.: *Numerische Strömungsberechnung*. Verlag Vieweg und Teubner, 2009
- [115] ROACHE, P.J.: Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 29 (1997), S. 123–160
- [116] SHYY, W.; GARBEY, M.; APPUKUTTAN, A.; WU, J.: Evaluation of Richardson Extrapolation in Computational Fluid Dynamics. In: *Numerical Heat Transfer (Part B)* 41 (2002), S. 139–164
- [117] CELIK, I. ET AL.: Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. In: *Transactions of the ASME* 130 (2008)
- [118] ROACHE, P.J.: Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. In: *Journal of Fluids Engineering* 116 (1994), S. 405–413
- [119] SALIM, M.; CHEAH, S.C.: Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-Bounded Turbulent Flows. In: *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 (IMECS)* 2 (2009)
- [120] MAROŠEVIC, T.: A choice of norm in discrete approximation. In: *Mathematical Communications* 1 (1996)
- [121] BENEDICT, L.H.; NOBACH, H.; TROPEA, C.: Estimation of turbulent velocity spectra from laser Doppler data. In: *Measurement Science and Technology* 11 (2000), S. 1089–1104
- [122] TUMMERS, M.J.; PASSCHIER, D.M.: Spectral analysis of biased LDA data. In: *Measurement Science and Technology* 12 (2001), S. 1641–1650
- [123] SIMON, L.; FITZPATRICK, J.: An improved sample-and-hold reconstruction procedure for estimation of power spectra from LDA data. In: *Experiments in Fluids* 37 (2004), S. 272–280
- [124] ADAMS, E. W.; EATON, J. K.: An LDA Study of the Backward-Facing Step Flow, Including the Effects of Velocity Bias. In: *Journal of Fluids Engineering* 110 (1988), S. 275–282
- [125] NIELSEN, P.V.: Modelling Complex Inlet Geometries in CFD - Applied to Air Flow in Ventilated Rooms. In: *12th AIVC Conference on Air Movement and Ventilation Control within Buildings* Ottawa, Canada, 1991
- [126] SREBRIC, J.; CHEN, Q.: A Method of Test to Obtain Diffuser Data for CFD Modeling of Room Airflow. In: *ASHRAE Transactions* 107 (2001), S. 108–116
- [127] SUSIN, R.M.; LINDNER, G. A.; MARIANI, V.C.; MENDON, K.C.: Evaluating the influence of the width of inlet slot on the prediction of indoor airflow: Comparison with experimental data. In: *Building and Environment* 44 (2009), S. 971–986

- [128] KHAN, J.A.; FEIGLEY, C.E.; LEE, E.; AHMED, M.R.; TAMANNA, S.: Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentrations. In: *Building and Environment* 41 (2006), S. 851–863
- [129] JOUBERT, P.; SANDU, A.; BEGHEIN, C.; ALLARD, F.: Numerical Study of the Influence of Inlet Boundary Conditions on the Air Movement in a Ventilated Enclosure. In: *5th International Conference on Air Distribution in Rooms* Yokohama, Japan, 1996
- [130] CAO, S.; MEYERS, J.: Influence of turbulent boundary conditions on RANS simulations of pollutant dispersion in mechanically ventilated enclosures with transitional slot Reynolds number. In: *Building and Environment* 59 (2013), S. 397–407
- [131] CAO, S.: *Construction of Low-Dimensional Ventilation Models using CFD Simulations*, KU Leuven, Belgien, Diss., 2013

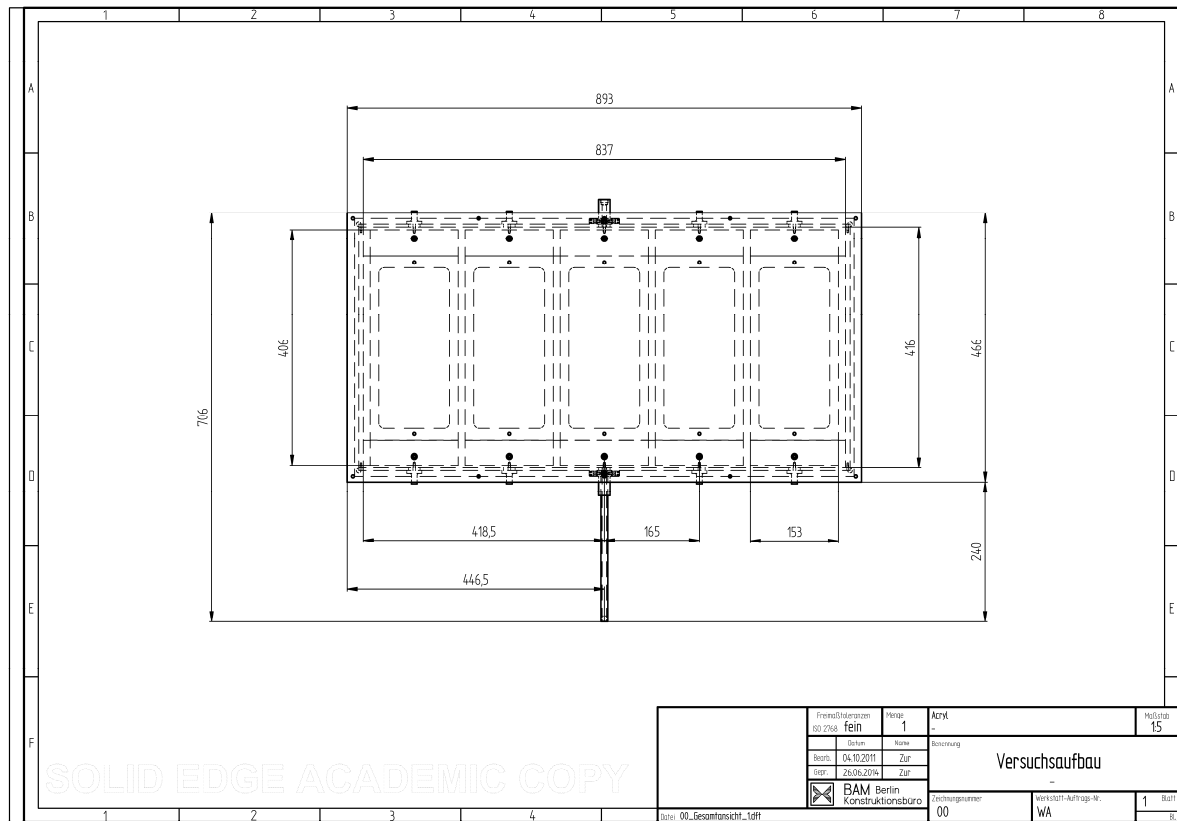
Anhang

A.1 Versuchsaufbau

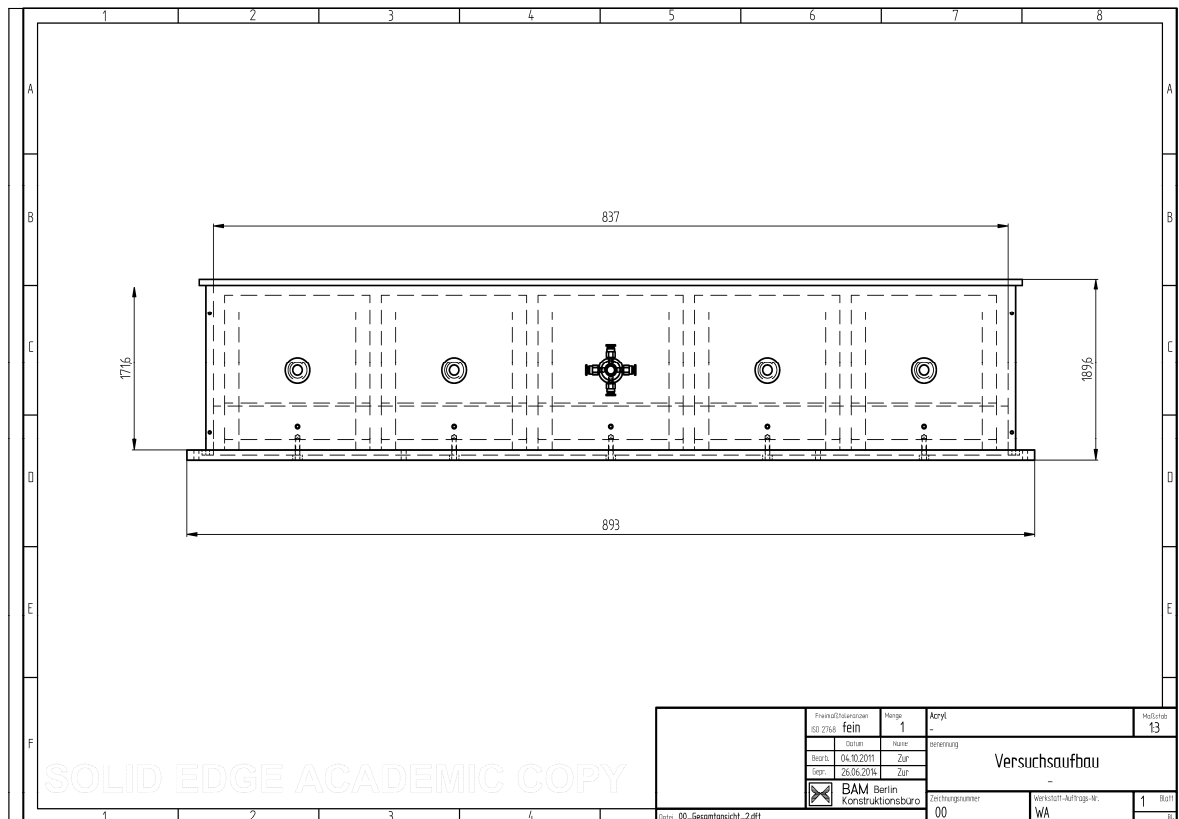
Iso-Ansicht Frachtraummodell



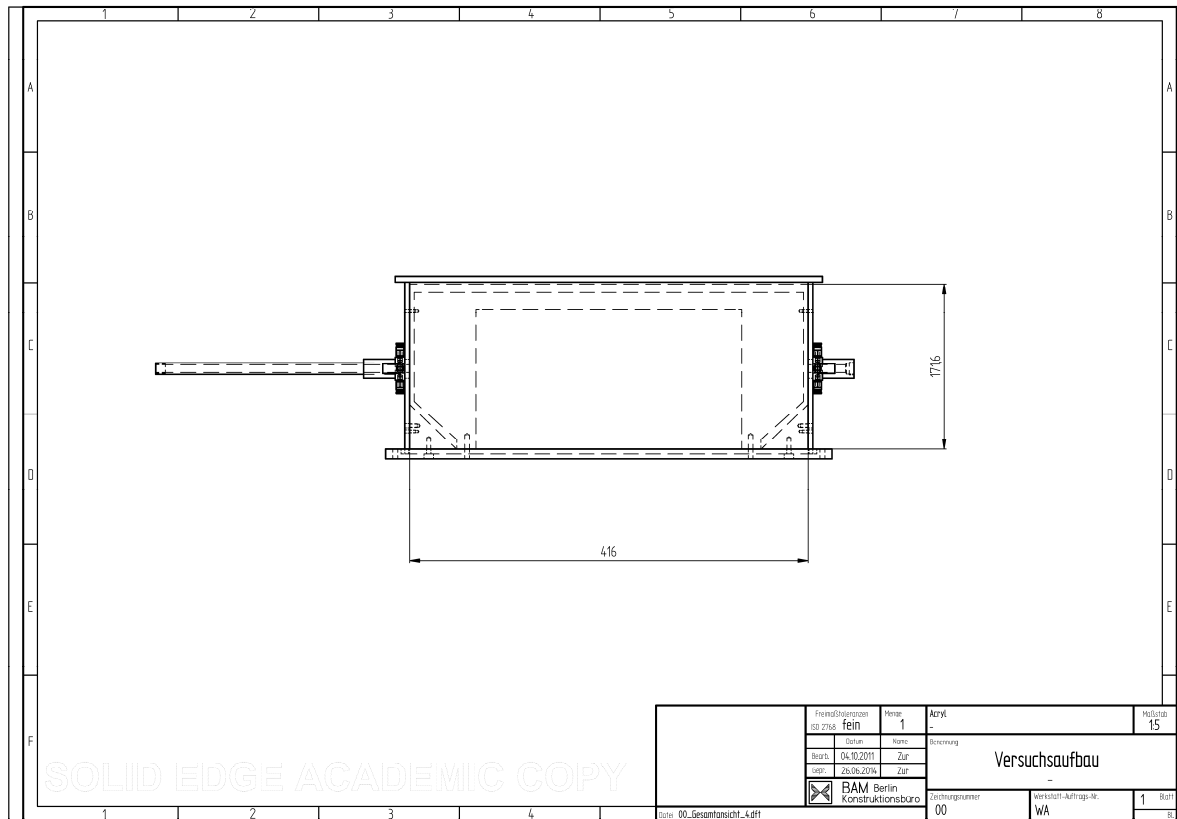
Draufsicht Frachtraummodell



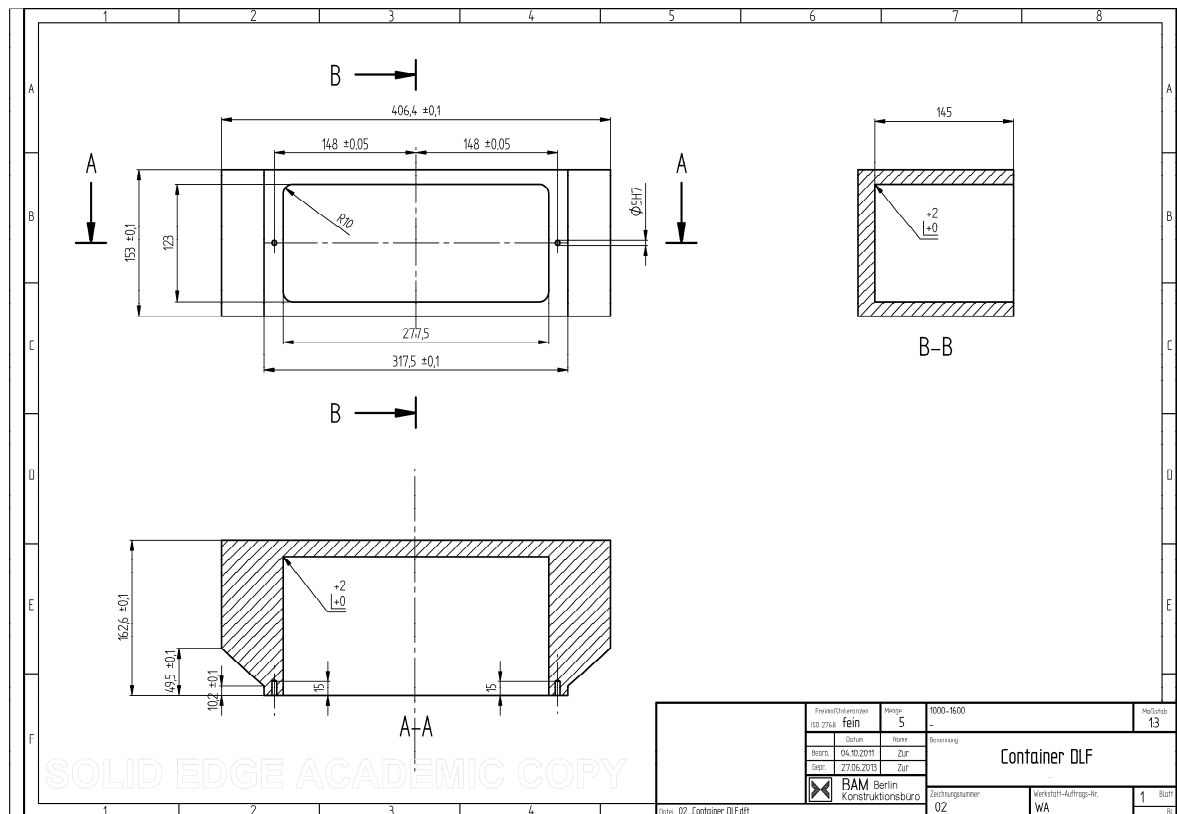
Vorderansicht Frachtraummodell



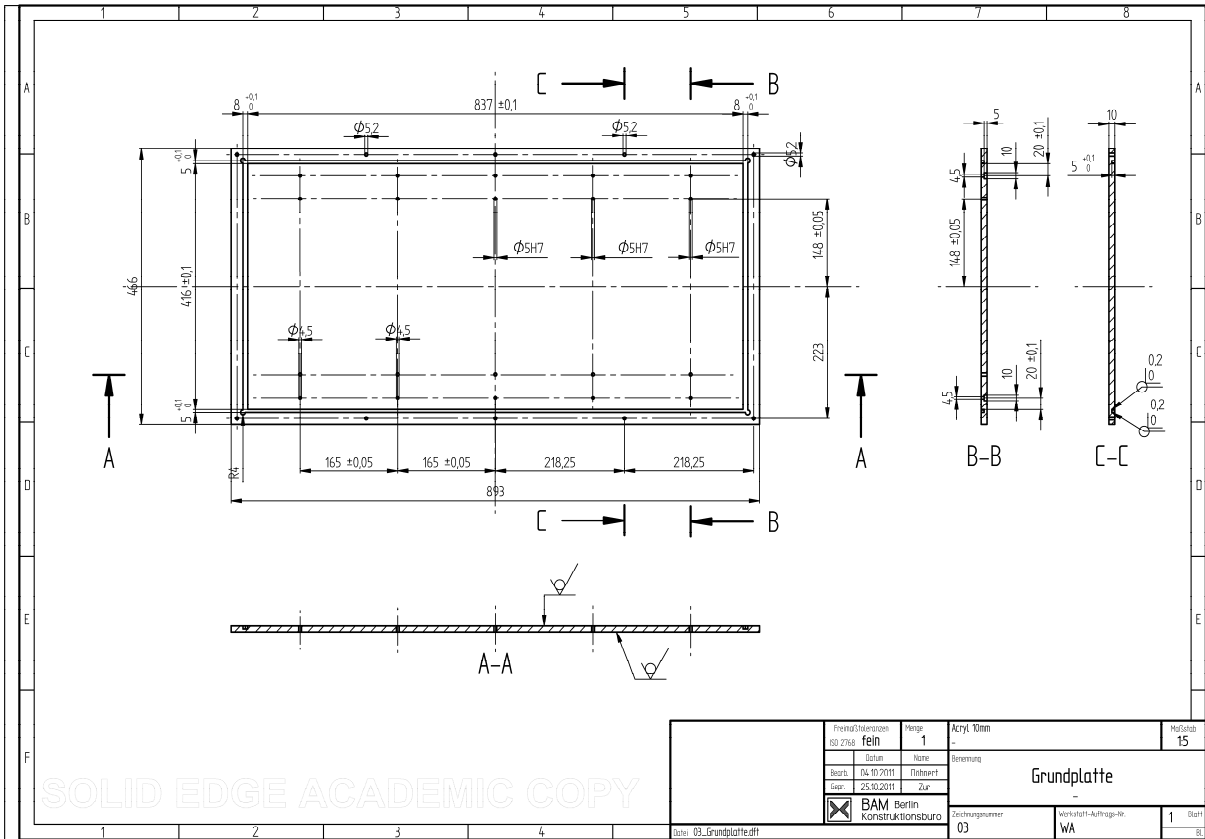
Seitenansicht Frachtraummodell



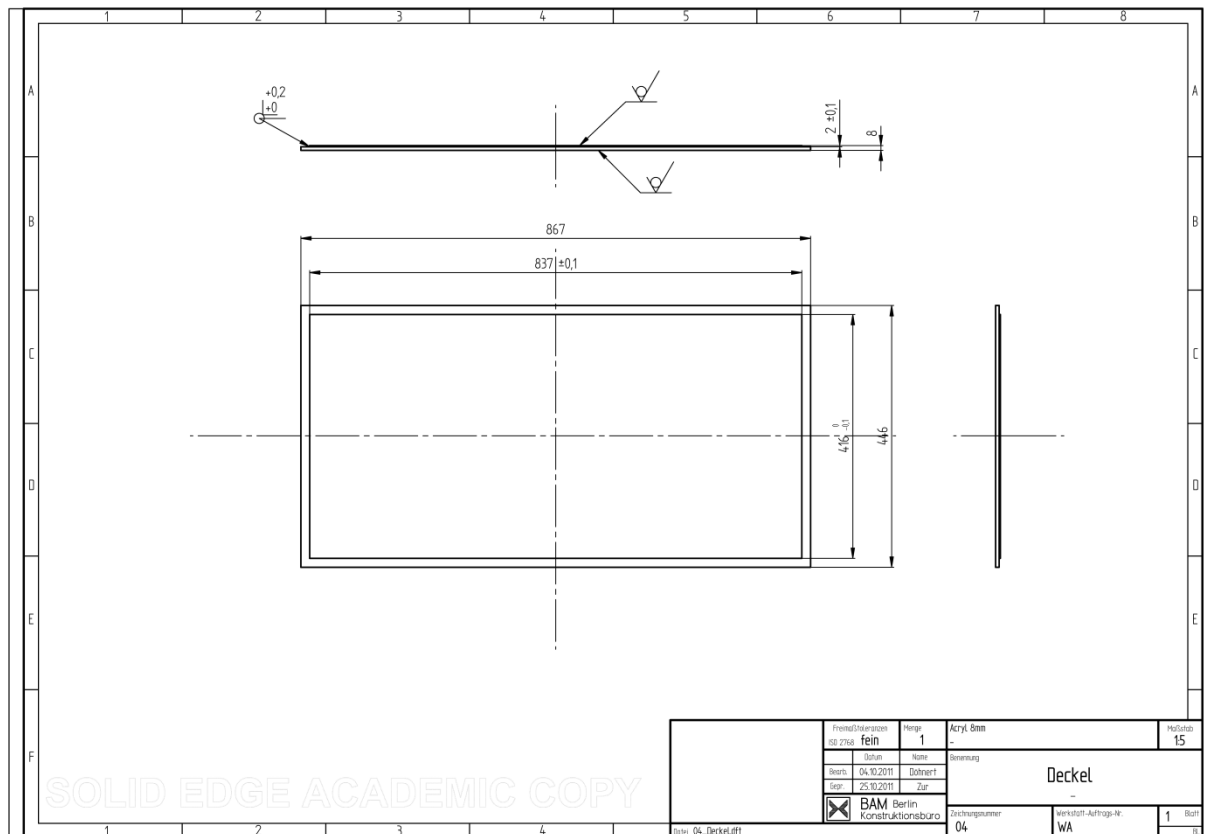
Fertigungszeichnung Container DLF



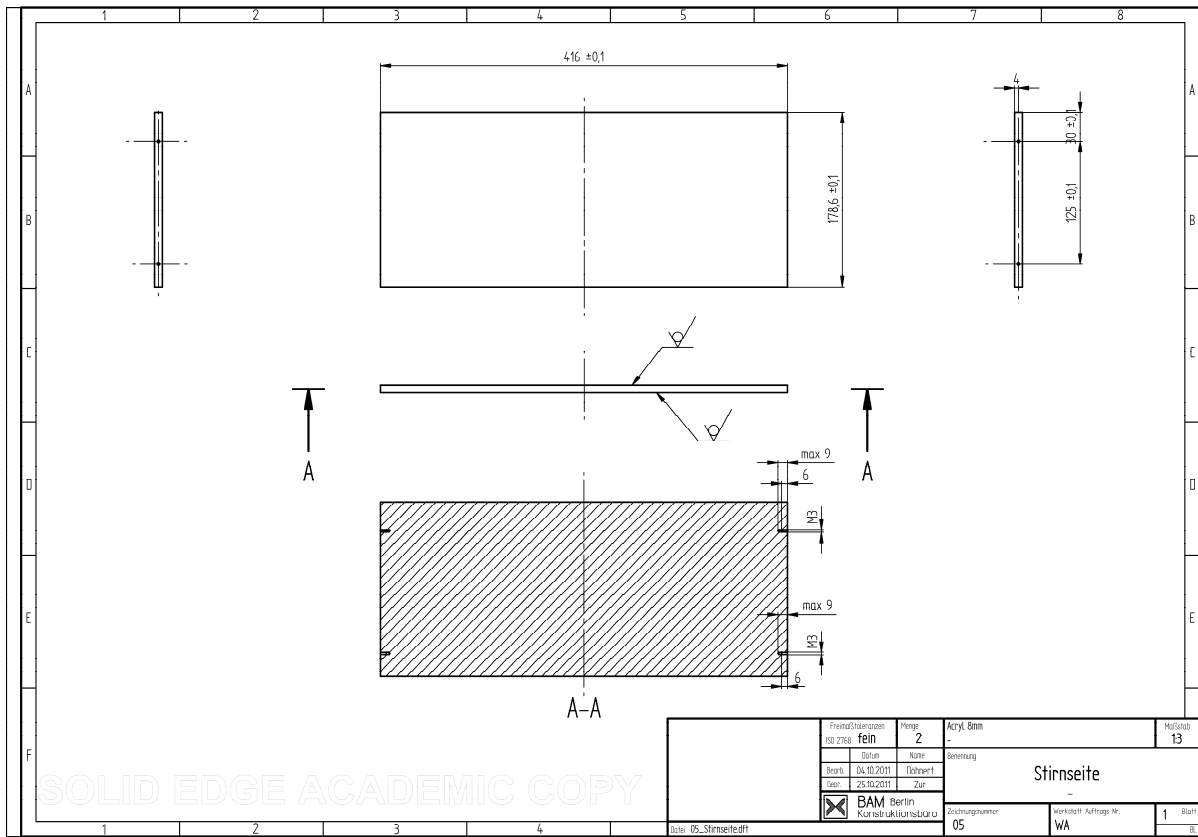
Fertigungszeichnung Grundplatte



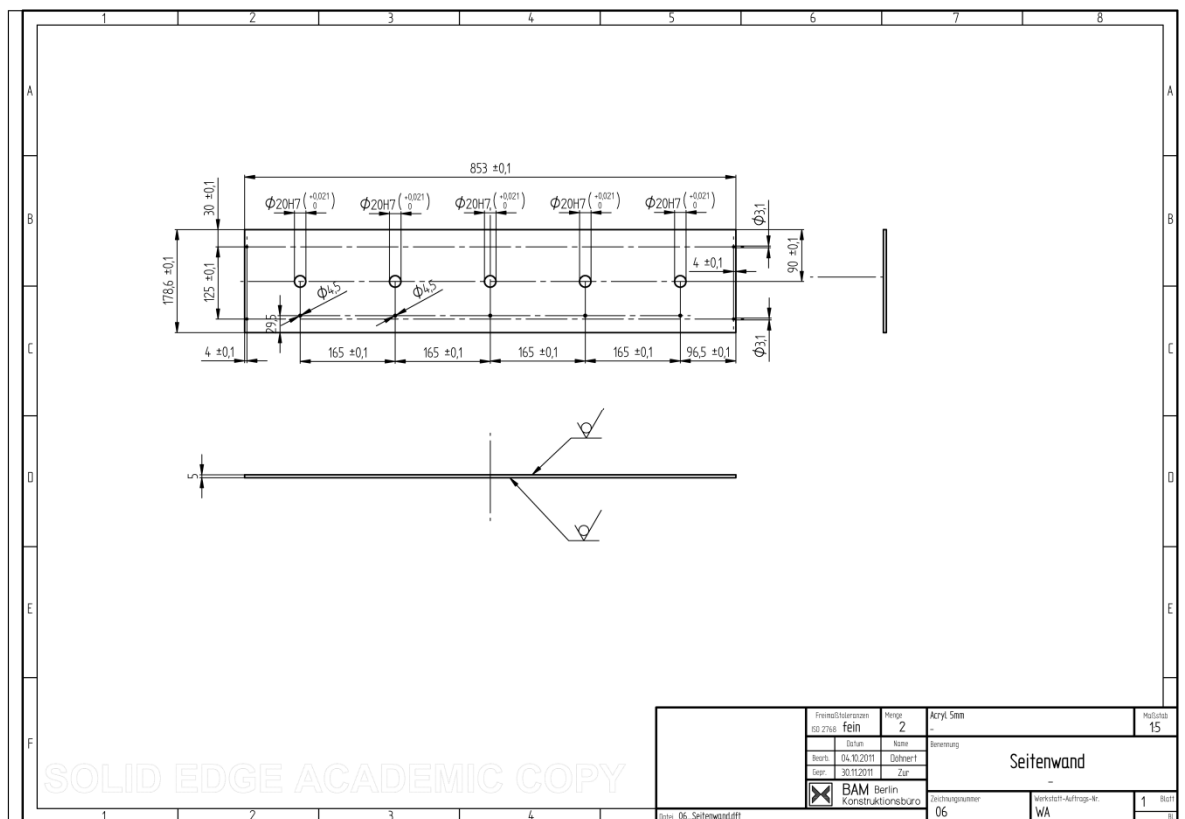
Fertigungszeichnung Deckel



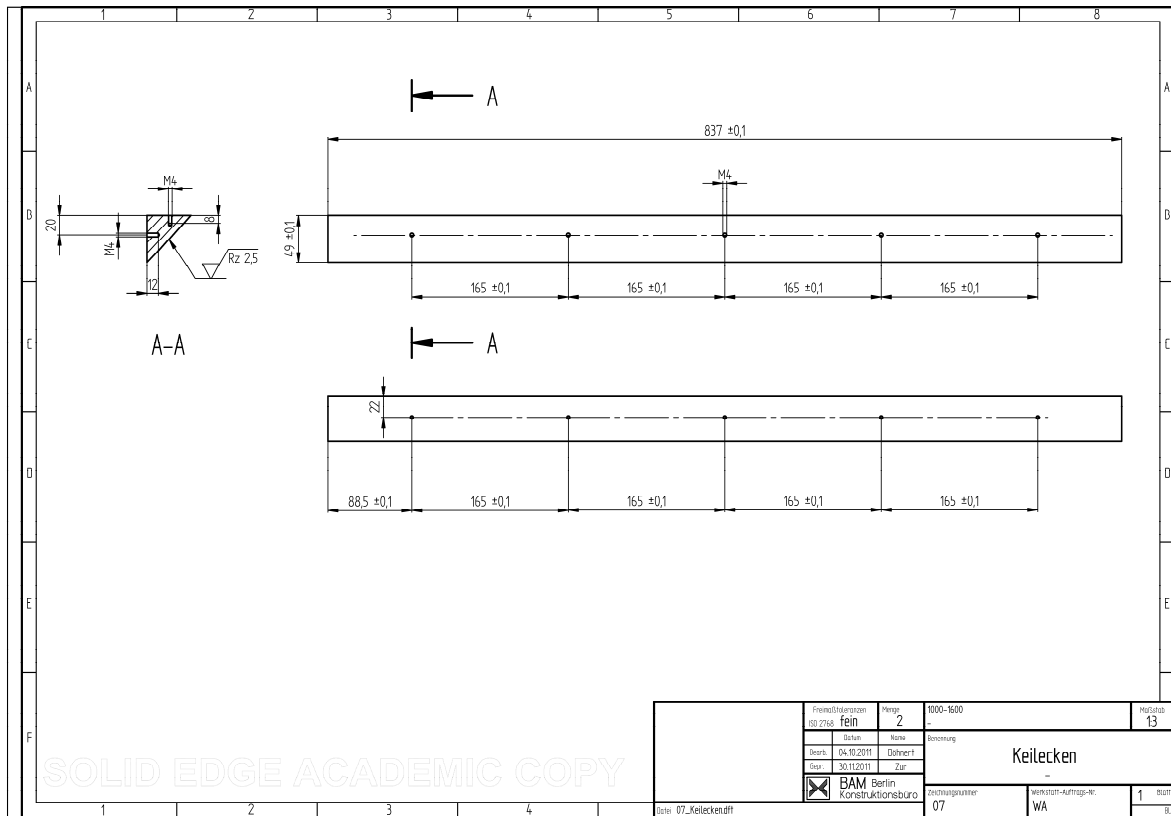
Fertigungszeichnung Stirnseite



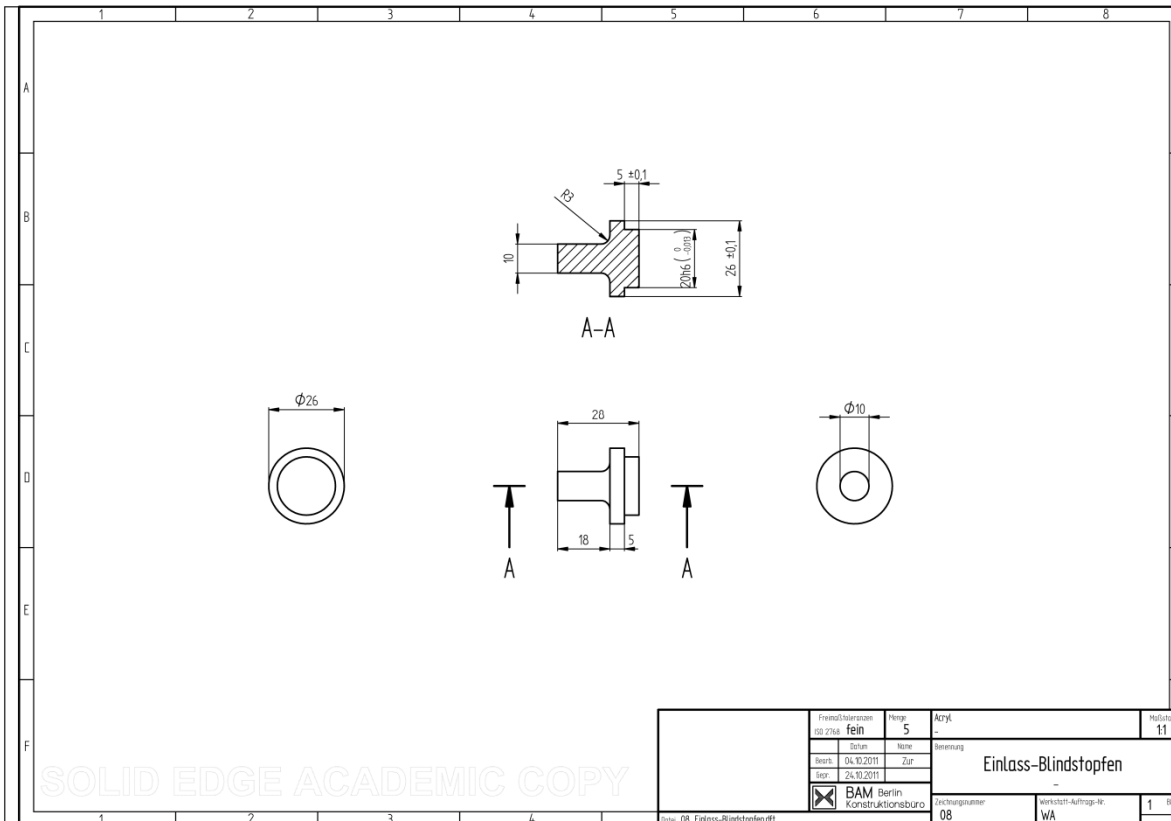
Fertigungszeichnung Seitenwand



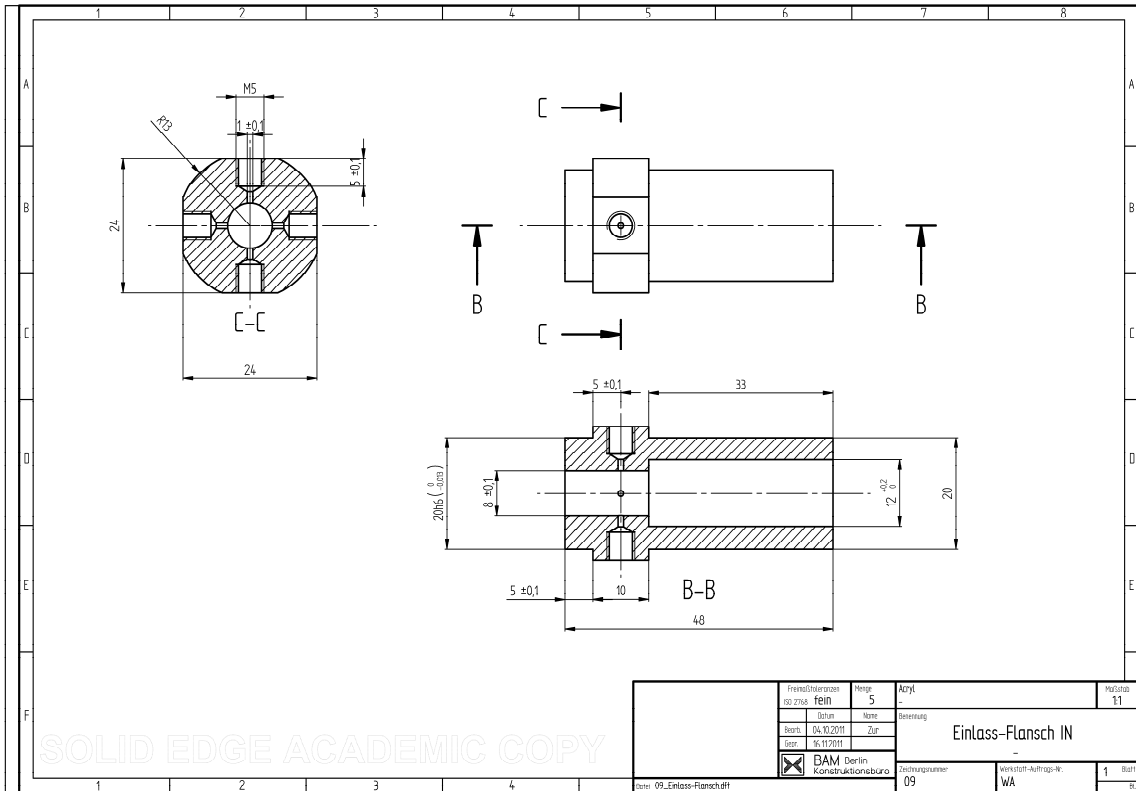
Fertigungszeichnung Keilecken



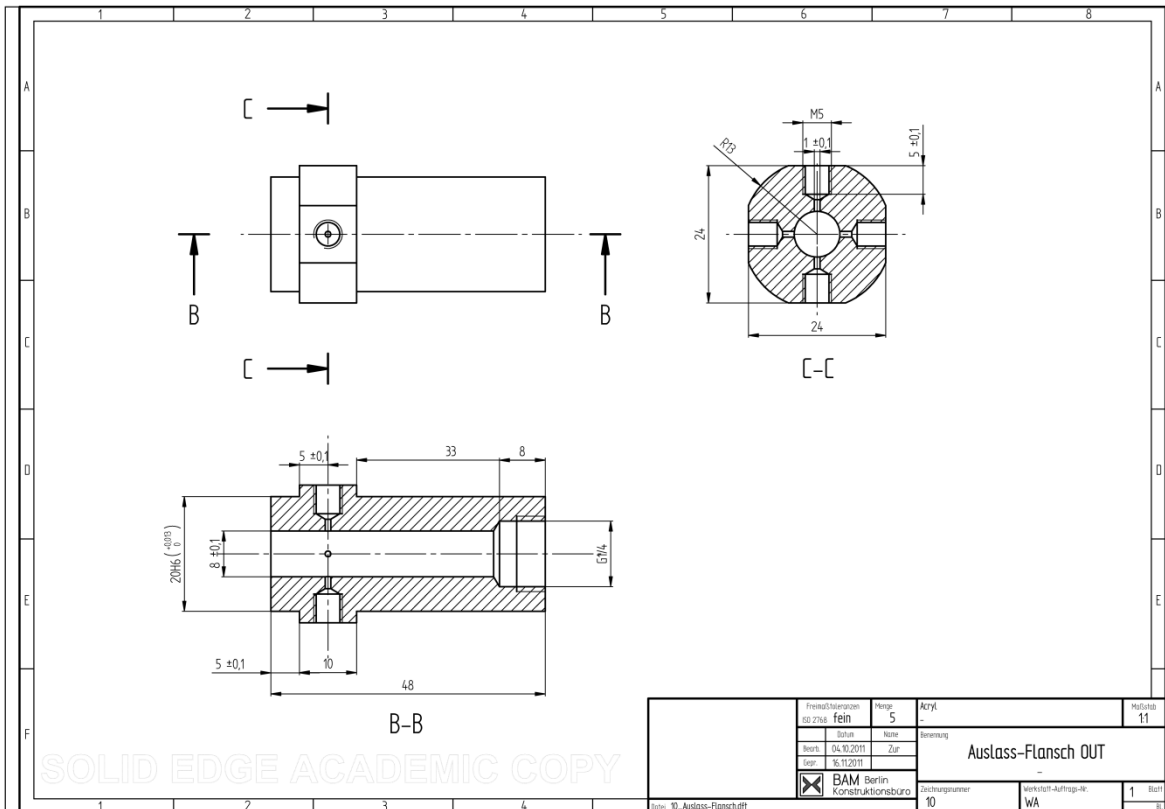
Fertigungszeichnung Einlass-Blindstopfen



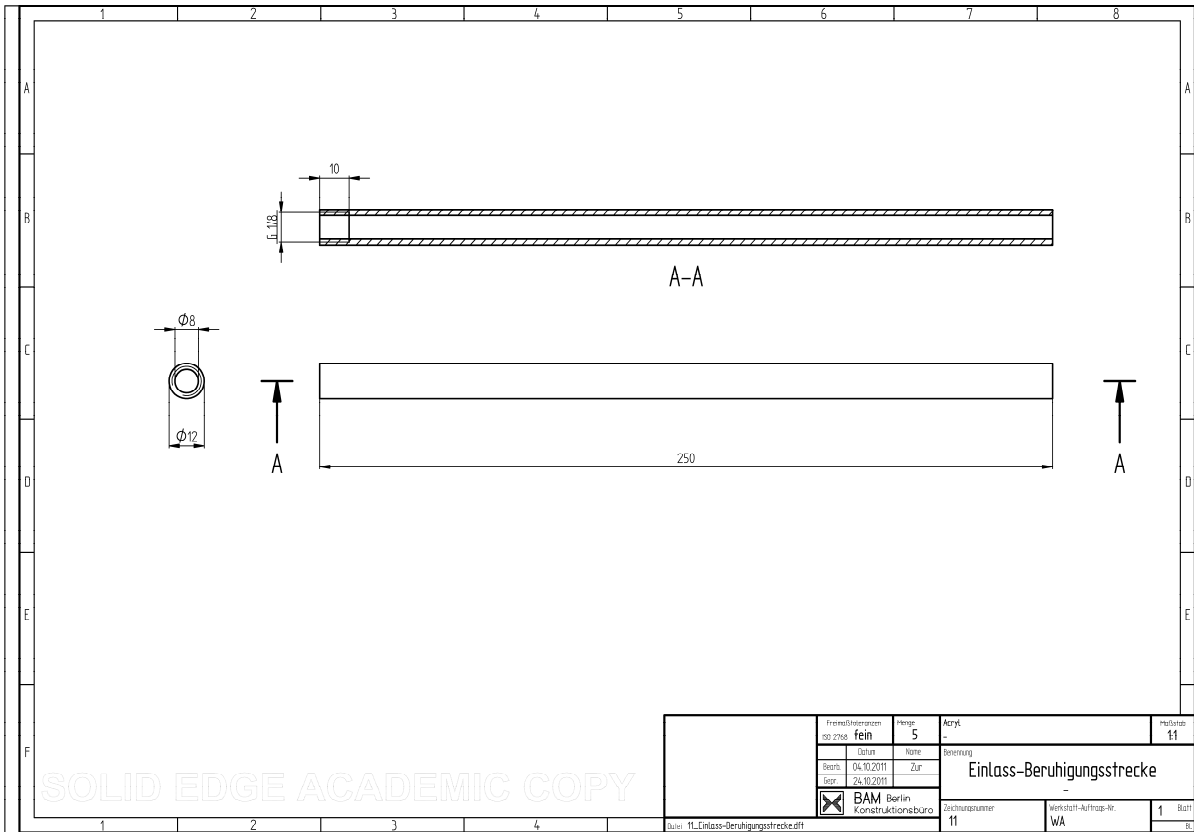
Fertigungszeichnung Einlass-Flansch



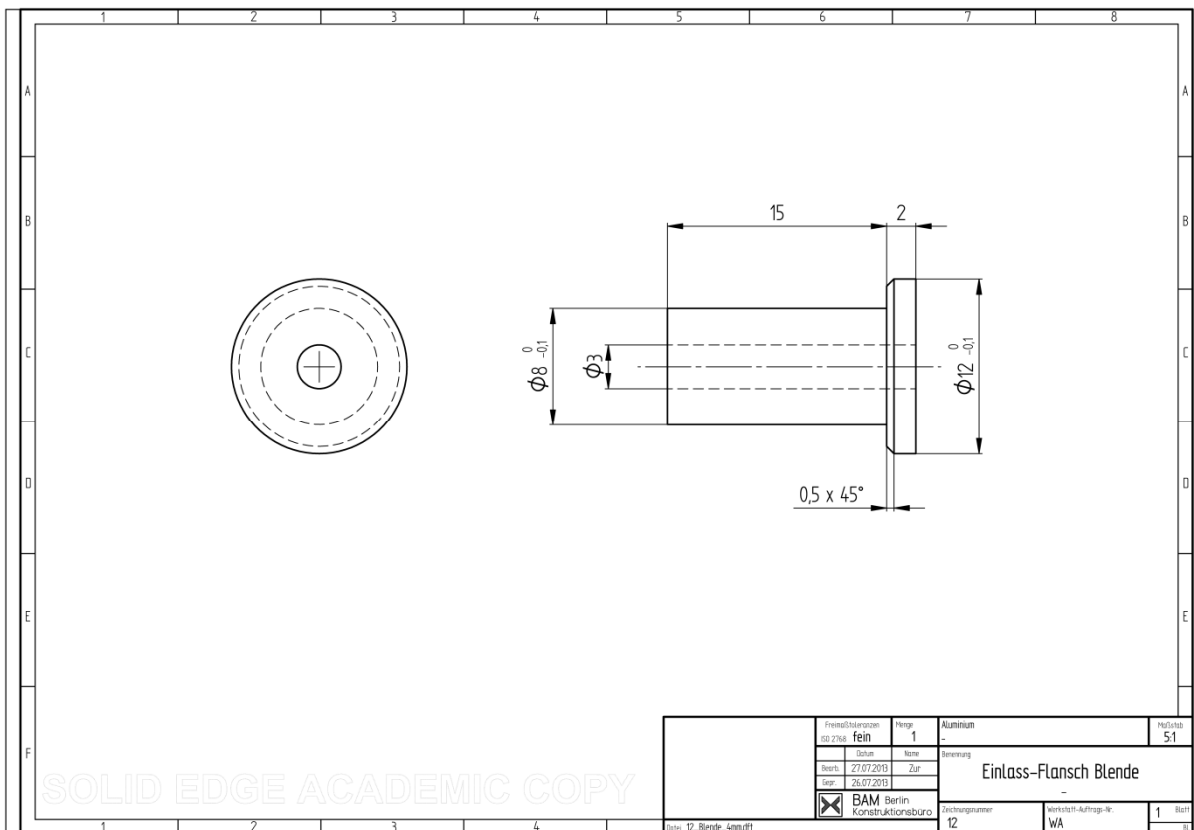
Fertigungszeichnung Auslass-Flansch



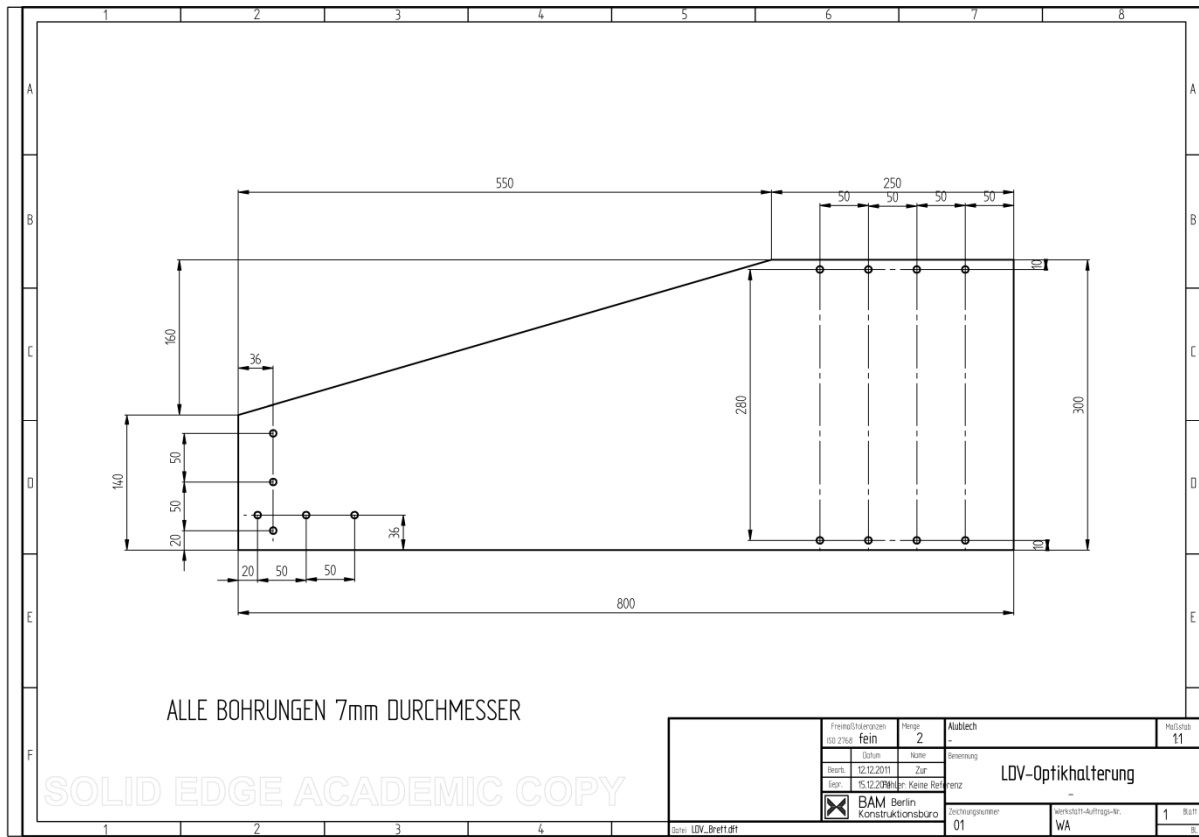
Fertigungszeichnung Einlass-Beruhigungsstrecke



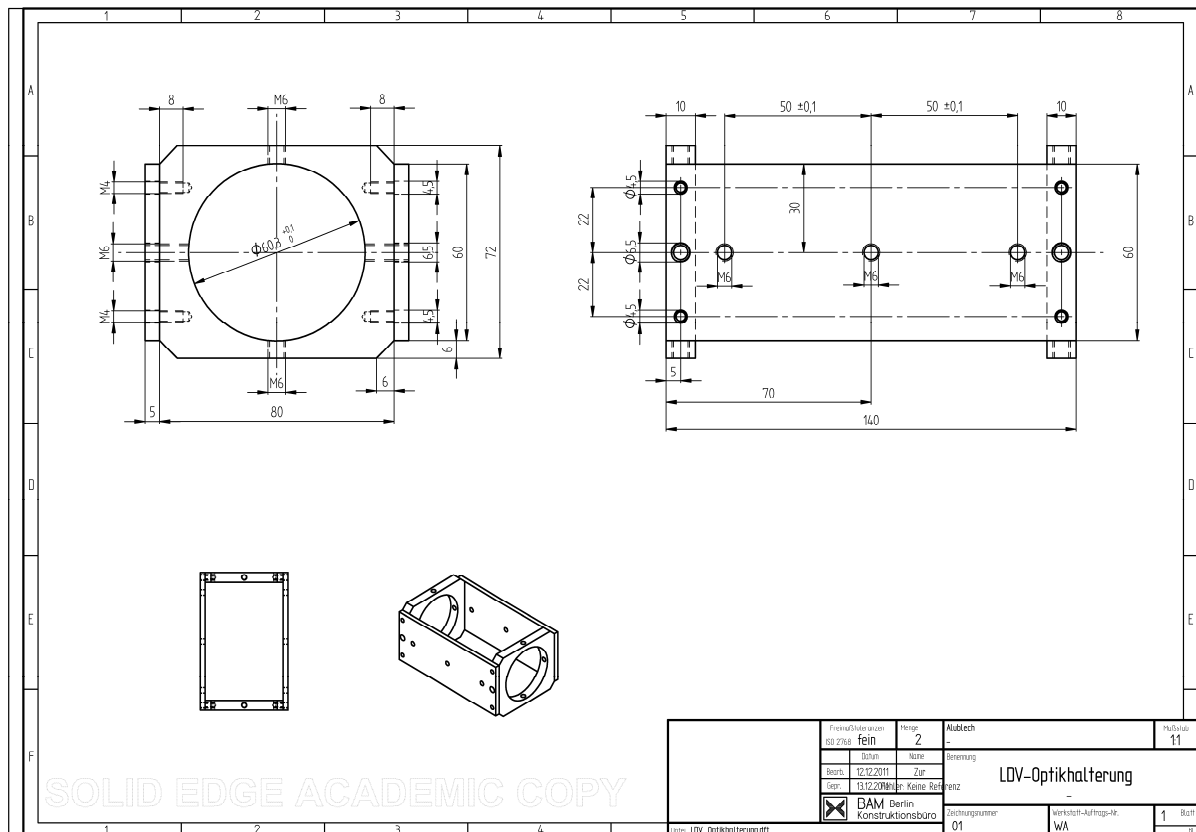
Fertigungszeichnung Einlass-Flanschblende



Fertigungszeichnung LDA-Optikhalterung Flansch



Fertigungszeichnung LDA-Optikhalterung Aufnahme



A.2 Versuchsdurchführung

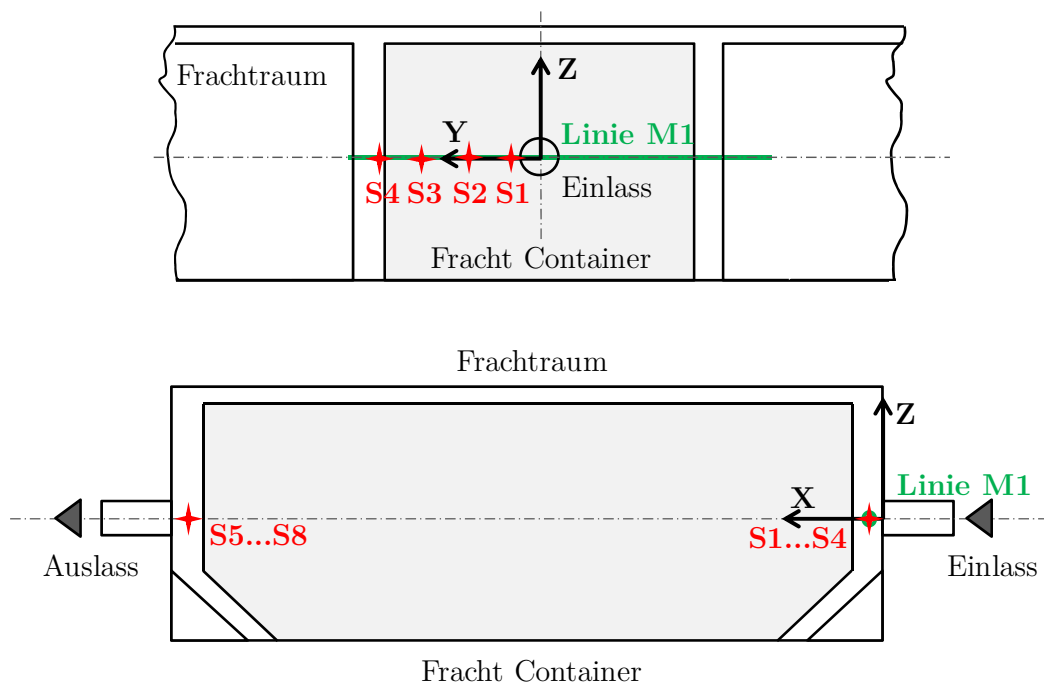
Spektralanalyse

Die in Abschnitt 5.2 dargestellte Spektralanalyse wird an den Messpunkten S1 ... S8 durchgeführt. Deren Koordinaten ergeben sich aus folgender Übersicht:

Position	X / mm	Y / mm	Z / mm
4S1	3	-10	0
S2	3	-20	0
S3	3	-30	0
S4	3	-40	0
S5	413	-5	0
S6	413	-10	0
S7	413	-15	0
S8	413	-20	0

Die Positionierung der Messpunkte S1 ...S8 im Modellfrachtraum ergibt sich aus folgender Übersicht:

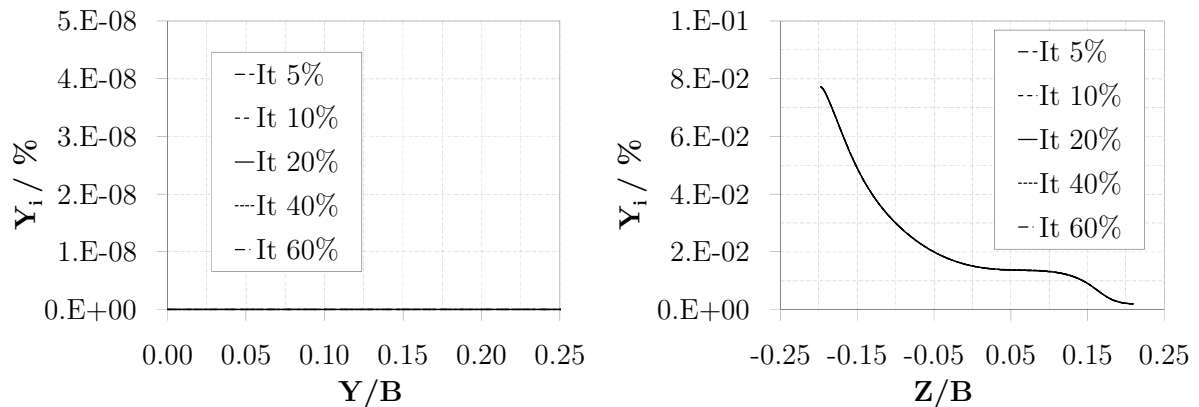
Übersicht der Positionen der Messpunkte S1 ...S8 im Modellfrachtraum



A.3 Untersuchung relevanter Einflussgrößen

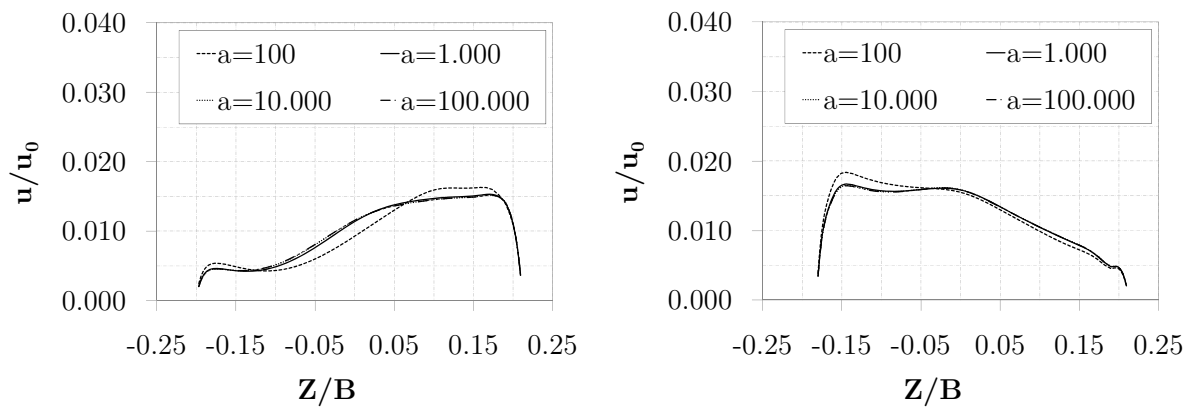
Einfluss des Turbulenzgrades auf den Stofftransport

Verlauf des Massenanteils Y_i an der Position M1 (links) und an der Position M4 (rechts) für verschiedene Turbulenzgrade



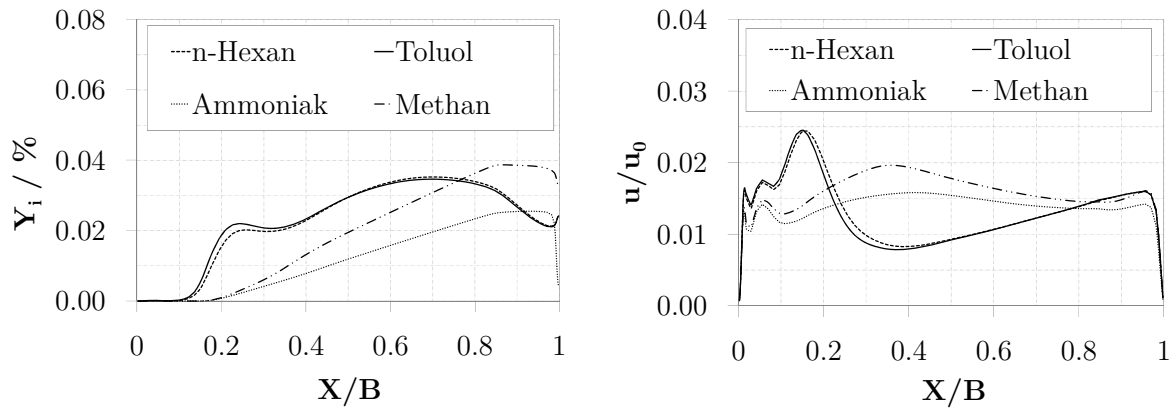
Einfluss des Einlassmassenstroms von Gefahrgut

Darstellung der normierten Geschwindigkeit u/u_0 für verschiedene Werte α an der Position M4 (links) und an der Position M5 (rechts)

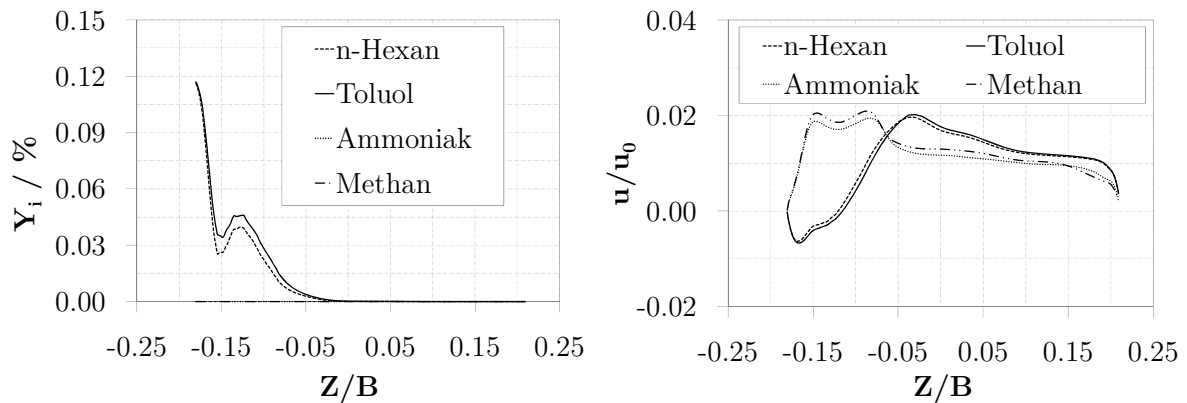


Einfluss des Gefahrguttyps

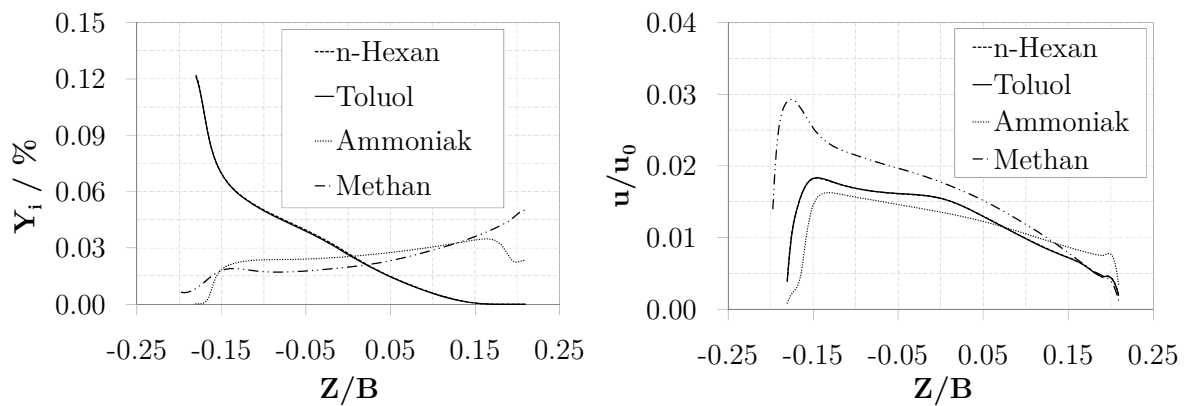
Darstellung des Massenanteils Y_i (links) und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 (rechts) an der Position M2 für die Stoffe n-Hexan, Toluol, Ammoniak und Methan



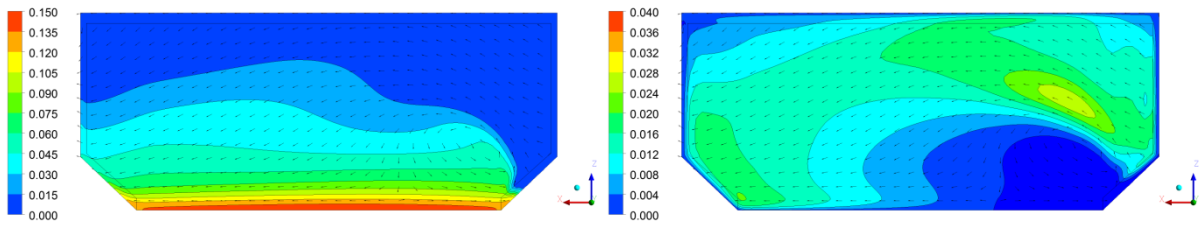
Darstellung des Massenanteils Y_i (links) und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 (rechts) an der Position M3 für die Stoffe n-Hexan, Toluol, Ammoniak und Methan



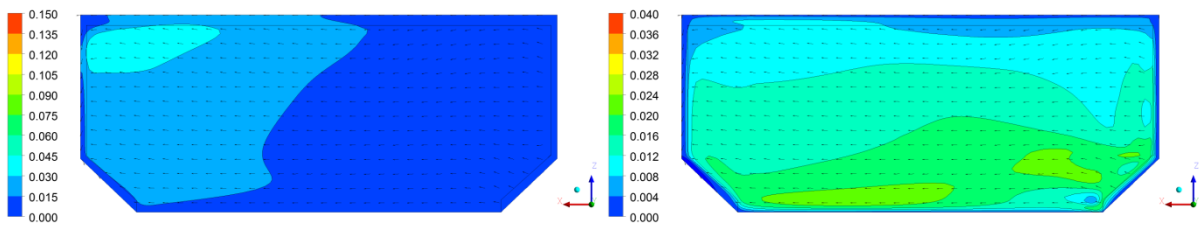
Darstellung des Massenanteils Y_i (links) und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 (rechts) an der Position M5 für die Stoffe n-Hexan, Toluol, Ammoniak und Methan



Darstellung des Massenanteils Y_i (links) und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 (rechts) für Toluol in der Ebene E-L



Darstellung des Massenanteils Y_i (links) und der normierten Geschwindigkeit u/u_0 (rechts) für Ammoniak in der Ebene E-L



Einfluss der Gefahrgutquelle

Massenanteile Y_i an der Position M3 (links) und an der Position M4 (rechts) für verschiedene Einlassquellentypen

