



OTTO VON GUERICKE  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-  
UND SYSTEMTECHNIK

# **Untersuchungen zur Ausbreitung brennbarer Schwergase in längsdurchströmten Straßentunneln**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Erik Scharff

geb. am 26. Juni 1988 in Anklam

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause

Prof. Dr.-Ing. Bernd Leitl

Dr. rer. nat. Kai Holtappels

Promotionskolloquium am 27. Februar 2025

## Erklärung der Selbstständigkeit

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Alle verwendeten fremden und eigenen Quellen sind als solche kenntlich gemacht und im Falle einer Ko-Autorenschaft, insbesondere im Rahmen einer kumulativen Dissertation, ist der Eigenanteil richtig und vollständig ausgewiesen. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberaterin/eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche der Urheberin/des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen können.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

(Salchow, im Mai 2024)



(Erik Scharff)

## Kurzreferat

In Verbindung neuartiger Antriebstechnologien könnten in Zukunft vermehrt brennbare Gase in den Verkehrsraum „Straßentunnel“ eingebracht werden. Bei Unfällen dieser Fahrzeuge mit anschließender Freisetzung der Gase ist die Möglichkeit gegeben, dass infolge der Bedingungen der Speicherung die in Frage kommenden Stoffe ein Schwergasverhalten zeigen. Aus sicherheitstechnischer Sicht ist dieses Szenario hinsichtlich seiner Auswirkungen auf das Tunnelbauwerk und involvierte Personen zu beurteilen. Die in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben zum Ziel, das Ausbreitungsverhalten, welches die Gase nach Freisetzung im Tunnel nehmen, zu ergründen sowie die Einflussnahme einzelner geometrischer wie betriebstechnischer Parameter hierbei zu bestimmen.

Konkret liegt dieser Arbeit das Szenario einer kontinuierlichen, impulsfreien Freisetzung von Propan innerhalb eines gewölbeförmigen Straßentunnels mit aktiver Längslüftung zugrunde. In einer theoretischen Betrachtung werden für dieses Szenario zunächst die ausbreitungsrelevanten, tunnelspezifischen Randbedingungen herausgearbeitet. Die Grundlage des anschließenden experimentellen Teils bilden zwei im Rahmen der Arbeit errichtete Versuchsstände, die sich in den wesentlichen Merkmalen ähneln, jedoch im Maßstab unterscheiden. In beiden Einrichtungen wurde basierend auf einem idealisierten Tunnelsegment das vorgenannte Freisetzungsszenario unter differierenden Randbedingungen nachgebildet. Das Ausbreitungsverhalten wird im Wesentlichen anhand der bodennahen über die Versuchsdauer gemittelten Konzentrationsverteilung beurteilt, die sich aus einer Vielzahl von im Versuchsgebiet angeordneten Detektoren ergibt. Die verwendeten Detektoren arbeiten nach dem Prinzip der Schwächung von infrarotem Licht bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoffverbindungen. Messungen zu den Eigenschaften des Strömungsfeldes begleiteten jeweils die Konzentrationsmessungen.

Die Konzeption des Versuchsstandes im Maßstab 1:12 beruht auf dimensionsanalytischen Betrachtungen. Die eigentliche Freisetzungskampagne umfasst eine Vielzahl von Einzelversuchen, bei denen ausgewählte Parameter im tunnelrelevanten Bereich variiert wurden. In den Experimenten trat das für Propan prognostizierte Schwergasverhalten deutlich hervor. In den Fällen, in denen die Wolke lateral beiderseits jeweils die Tunnelwand erreichte, fand eine Kanalisierung der Gase statt, die mit einer verminderten longitudinalen Verdünnung einherging. Es gelang die Freisetzungsrate wie die Strömungsgeschwindigkeit als Faktoren, die den größten Einfluss nehmen, zu identifizieren. Dabei wirkt erstere grundsätzlich konzentrationssteigernd, letztere konzentrationsmindernd. Alle weiteren getesteten Parameter hatten komplexere Ausbreitungssituationen zur Folge, die zu einer differenzierten Betrachtung der Einflussnahme zwingen. Ebenfalls konzentrationsmindernd wirkte das Anheben der Quelle vom Boden. Bei außermittig angeordneter

Quelle sowie Querneigung der Fahrbahn beschränkte sich die Einflussnahme weitgehend auf die laterale Konzentrationsverteilung in unmittelbarer Quellnähe. Beide Parameter sowie eine mögliche Längsneigung der Fahrbahn wirkten sich trotzdem nur geringfügig auf den quellferneren Bereich stromab aus. Bei starker Längsneigung konnte überdies das von der Brandrauchausbreitung im Tunnel bekannte Phänomen des Backlayering nachgewiesen werden. Hindernisse führten zu weiter komplexeren Strukturen. Während sich global die Verdünnung der Wolke anteilig invariant gegenüber Hindernissen zeigte, war auf lokaler Ebene unter gewissen Voraussetzungen sowohl eine deutliche Konzentrationszunahme als auch -abnahme zu beobachten. Für den hindernisfreien Tunnel lässt sich schließlich ein dimensionsloser Parameter definieren, der den Verlauf der longitudinalen Verdünnung am Boden innerhalb der Schwergaswolke beschreibt. Darauf aufbauend wurde im Anschluss ein einfaches grafisches Nomogramm für die kontinuierliche Freisetzung schwerer Gase in hindernisfreier Tunnelumgebung abgeleitet, anhand dessen sich die Konzentration in Abhängigkeit von einer dimensionslosen Quellentfernung abschätzen lässt.

Zum Zwecke der Exploration des realen, unverzerrten Verhaltens wurden darüber hinaus Versuche im Originalmaßstab vorgenommen. Aufgrund der maßstäblichen Ähnlichkeit beider Versuchsstände wurde anhand der Versuchsergebnisse zudem die Skalierbarkeit der Ausbreitungssituationen überprüft. Exemplarisch wurden hierfür zwei bereits im Kleinmaßstab untersuchte Konfigurationen ausgewählt. Als Einschränkung bei Versuchsdurchführung sowie als hinderlich für den Vergleich erwies sich indes die trotz ergriffener Gegenmaßnahmen weiterbestehende ausgeprägte Abhängigkeit der Strömungsbedingungen im Ausbreitungsgebiet von den äußeren Windbedingungen. Die Freisetzung im Großmaßstab war mit ausgeprägter Aerosolbildung verbunden. Die dem Schwergasverhalten entsprechende bodennahe Ausbreitung bestätigte sich. Im Detail zeigte sich die Ausbreitung aber weitaus instationärer. Bei Betrachtung der zeitgemittelten Konzentrationen bildeten sich die bereits aus dem Kleinversuch bekannten Verläufe qualitativ in guter Näherung ab. Verbleibende quantitative Differenzen veranlassen hingegen zu einer kritischen Betrachtung. Diese Diskrepanz ist aber mit hoher Wahrscheinlichkeit den im spezifischen Einzelfall einzugehenden versuchstechnischen Kompromissen geschuldet.

Aus dem beobachteten Gasverhalten wird schließlich die Entstehung eines Flächenbrandes nach Entzündung der freigesetzten Gase als wahrscheinlichstes Folgeszenario der Freisetzung schwerer, brennbarer Gase in tunnelartigen Umschließungen erachtet. Mit Empfehlungen zum zukünftig zu favorisierenden methodischen Vorgehen schließt die Arbeit.

## Abstract

In combination with new types of drive technologies, more and more flammable gases could be introduced into the traffic area “road tunnel” in future. If these vehicles have an accident and the gases are subsequently released, there is the possibility that the mentioned substances show a heavy gas behavior due to their storage conditions. From a safety point of view, this scenario has to be assessed with regard to its effects on the tunnel structure and the people involved. The aim of the experimental investigations carried out in this work is to create the basis for such an analysis by investigating the spreading behavior of the gases after they have been released in the tunnel and determining the influence of individual geometric and operational parameters on this behavior.

Specifically, this work is based on the scenario of a continuous, momentum-free release of propane within a vaulted road tunnel with active longitudinal ventilation. The tunnel-specific boundary conditions that are relevant to this scenario are first worked out by a theoretical analysis. The basis of the subsequent experimental part is formed by two test rigs built as part of the work, which are similar in their essential features, but differ in scale. In both facilities, the aforementioned release scenario was simulated under various boundary conditions based on an idealized tunnel segment. The dispersion behavior is primarily assessed by the averaged concentration distribution near the ground, which results from a large number of detectors arranged in the experimental area. The detectors operate on the principle of weakening infrared light in the presence of hydrocarbons. Measurements of the flow field properties accompany the concentration measurements.

The conception of the test rig on a scale of 1:12 is based on dimensional analysis. The actual release campaign comprises a large number of individual experiments in which selected parameters were varied over the tunnel-relevant range. The predicted heavy gas behavior for propane emerged clearly in the experiments. In cases in which the cloud laterally reaches the tunnel walls, the gases are channeled, which is accompanied by reduced longitudinal dilution. It was possible to identify the release rate and the flow velocity as the factors that have the greatest influence. The former basically increased the concentration, while the latter decreased it. All other tested parameters resulted in more complex propagation situations, which force a differentiated consideration of the influence. Lifting the source from the ground also reduced the concentration. In the case of an eccentrically arranged source and a transverse slope of the roadway, the influence is largely limited to the lateral concentration distribution in the immediate vicinity of the source. Nevertheless, both parameters plus a possible longitudinal slope of the roadway only showed a

slight effect on the area far-downstream from the source. In addition, the phenomenon of back-layering, which is known from the spreading of fire smoke in the tunnel, could be demonstrated with a steep longitudinal slope. Obstacles increased the complexity of the situation. While globally the dilution of the cloud is partly invariant to obstacles, locally an increase as well as a decrease in concentration can be observed under certain conditions. For the unobstructed tunnel, it was finally possible to define a dimensionless parameter that describes the curve of the longitudinal dilution on the ground within the heavy gas cloud. From this, a simple graphical nomogram is derived for the continuous release of heavy gases in an unobstructed tunnel environment, which can be used to estimate the concentration in relation of a dimensionless source distance.

For exploring the real, undistorted behavior experiments were also carried out in original scale. Due to the similarity of both test rigs in terms of scale, the test results can also be used to check the scalability of the spreading situations. For that, two configurations that have already been examined in small scale were selected. The main limitation for test execution and regarding the scalability comparison was the dependence of the flow conditions within the test rig from external wind conditions which occurred despite of taken countermeasures. The large-scale release was associated with pronounced fog formation. The near-ground spreading corresponding to the heavy gas behavior could be confirmed. However, in detail the spread was far more unsteady. Looking at the time-averaged concentrations, the processes already known from the small-scale test were qualitatively well approximated. Remaining quantitative differences, however, require critical consideration. This discrepancy is more likely a consequence of the experimental compromises have to be made in the specific case.

From the observed gas behavior, the development of a surface fire initiated by ignition of the released gases is considered to be the most likely subsequent scenario for the release of heavy, flammable gases in tunnel-like enclosures. The thesis concludes with recommendations on the methodological approach to be favored in the future.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung der Selbstständigkeit.....</b>	<b>II</b>
<b>Kurzreferat.....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XVI</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Vorgehensweise und Methodenwahl.....	4
1.3 Untersuchungsszenario.....	6
<b>2 Stand der Technik und des Wissens.....</b>	<b>7</b>
2.1 Brennbare Gase schwerer als Luft.....	7
2.1.1 Brennbare Gase im Straßenverkehr.....	7
2.1.2 Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase.....	10
2.1.3 Auftreten von Schwergasverhalten.....	12
2.2 Ausbreitung von Gasen schwerer als Luft.....	15
2.2.1 Phänomenologie der Ausbreitung schwerer Gase.....	15
2.2.2 Experimentelle Methoden zur Untersuchung schwerer Gaswolken.....	19
2.2.3 Dimensionsanalytische Modelle der Schwergasausbreitung.....	23
2.3 Ausbreitungsrelevante Randbedingungen in Tunnelbauwerken.....	26
2.3.1 Geometrische Restriktionen.....	26
2.3.2 Durch die Tunnellüftungsanlage erzwungene Strömung.....	27
2.3.3 Hindernisstrukturen durch szenarienbedingte Staubbildung.....	29
2.3.4 Freisetzungsbedingungen.....	32
2.3.5 Weitere Bedingungen.....	32
2.4 Ausgewählte Untersuchungen zur Stoffausbreitung.....	33
2.4.1 Tunnelspezifische Untersuchungen schwerer Gase.....	33
2.4.2 Schwergasexperimente im Zuge der VDI 3783 Blatt 2.....	36
2.4.3 Untersuchungen zur Brandrauchausbreitung im Tunnel.....	37
2.4.4 Untersuchungen zum Hinderniseinfluss.....	38
<b>3 Untersuchungen im Modellmaßstab.....</b>	<b>40</b>
3.1 Tunnelbezogene Dimensionsanalyse.....	40
3.2 Versuchsaufbau – der Modellversuchsstand.....	42

3.3	Modellskalierung und Anwendungsgrenzen .....	52
3.4	Untersuchungen der Strömungsbedingungen im Modellgebiet .....	53
3.5	Versuchsdurchführung und Ergebnisdarstellung .....	56
3.6	Untersuchungen im hindernisfreien Modellgebiet .....	59
3.6.1	Bodenkonzentrationen bei Standardkombinationen .....	59
3.6.2	Versuchsstreuung der mittleren Konzentrationen bei Standardkombinationen .....	62
3.6.3	Sensitivität der Konzentration infolge vom Sollwert abweichender Betriebsparameter .....	62
3.6.4	Konzentration in erhöhter Messposition .....	64
3.7	Untersuchungen bei Parametervariation .....	65
3.7.1	Einfluss der Betriebsparameter .....	65
3.7.2	Längsneigen des Bodens .....	68
3.7.3	Prüfen des Backlayerings bei Längsneigung .....	70
3.7.4	Querneigen des Bodens .....	72
3.7.5	Außermittig positionierte Quelle .....	73
3.7.6	Anheben der Quelle .....	75
3.8	Untersuchungen bei Anwesenheit von Hindernissen .....	78
3.8.1	Positionierung eines Würfelhindernisses stromauf der Quelle .....	78
3.8.2	Konzentration in erhöhter Messposition bei Anwesenheit des Einzelwürfelhindernisses stromauf der Quelle .....	80
3.8.3	Positionierung eines Würfelhindernisses stromab der Quelle .....	81
3.8.4	Positionierung mehrerer Hindernisse in stauähnlicher Anordnung .....	83
3.9	Weiterführende Untersuchungen zur Ausbreitung schwerer Gase .....	87
3.9.1	Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs im hindernisfreien Modelltunnel .....	87
3.9.2	Vereinfachte Beschreibung des longitudinalen Konzentrationsverlaufs für den hindernisfreien Modelltunnel .....	88
3.9.3	Vergleich der Ergebnisse mit dimensionsanalytischen Modellen .....	91
3.9.4	Entwicklung eines Nomogramms für die Tunnelumgebung .....	95
<b>4</b>	<b>Untersuchungen im Originalmaßstab .....</b>	<b>97</b>
4.1	Versuchsaufbau – der Großversuchsstand .....	97
4.2	Vor- und Begleituntersuchungen .....	104
4.2.1	Strömungsbedingungen in der Tunnelgeometrie .....	104
4.2.2	Freisetzungskarakteristik der Quelle .....	106
4.2.3	Bestimmung des Flüssiganteils .....	107

4.3	Beschränkungen des Großversuchsstandes .....	108
4.4	Untersuchung der Verifizierungskonfigurationen im Modellmaßstab .....	109
4.5	Messkampagne im Großversuchsstand .....	110
4.5.1	Versuchsumfang .....	110
4.5.2	Allgemeine Beobachtungen zur Ausbreitung im Realmaßstab .....	112
4.5.3	Auswertung der longitudinalen Konzentrationsverteilung .....	114
4.6	Maßstäblicher Vergleich .....	117
4.6.1	Qualitativer Vergleich der gemessenen Konzentrationsverläufe .....	117
4.6.2	Detaillierter quantitativer Vergleich.....	119
4.6.3	Vergleich unter Berücksichtigung von Temperatureffekten .....	120
4.6.4	Signifikanztest der Abweichungen .....	122
4.6.5	Ursachenermittlung für signifikante Diskrepanz .....	124
4.6.6	Vergleich anhand des Hinderniseinflusses .....	126
4.6.7	Vergleich mit abgeleitetem tunnelspezifischem Nomogramm .....	127
4.7	Neue Erkenntnisse zur Ausbreitung nach den Großversuchen .....	128
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>129</b>
5.1	Zusammenfassung der Ausbreitung schwerer Gase in tunnelartigen Umschließungen.....	129
5.1.1	Allgemeines Ausbreitungsverhalten von Propan.....	129
5.1.2	Einfluss von Parametern im hindernisfreien Straßentunnel .....	130
5.1.3	Einfluss von Hindernissen auf die Ausbreitung im Straßentunnel .....	131
5.2	Szenariobezogene Sicherheitsbetrachtung .....	133
5.2.1	Entwurf eines Ereignisablaufs.....	133
5.2.2	Erkenntnisse hinsichtlich Notfallstrategie .....	134
5.3	Empfehlungen für weiteres methodisches Vorgehen .....	135
<b>6</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>138</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>141</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>149</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Temperaturabhängiges Dichteverhältnis ausgewählter brennbarer Gase zu Luft bei Normalbedingungen.....	14
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Schwergaswolken im Längsprofil bei vorhandener Umgebungsströmung nach [38] mit Markierung der phänomenologischen Phasen der Ausbreitung: 1 - Initialphase, 2 - gravitationsgetriebene Phase, 3 - beinahe passive Phase, 4 - passive Phase ...	17
Abbildung 2-3: Verlauf der Isokontur der Konzentration (durchgezogene schwarze Linie) eines impulslos freigesetzten Schwergases bei vorhandener Umgebungsströmung in der x-y-Ebene (angelehnt an [32]).....	18
Abbildung 2-4: Rechteckiger (links) sowie gewölbeförmiger (rechts) Querschnitt von Straßentunneln nach [23] mit Bezeichnungen und Begrenzung des Verkehrsraumes (gestrichelt).....	27
Abbildung 2-5: Schematische Umströmung eines ebenerdigen Würfels als Repräsentant eines stumpfen Körpers mit Kennzeichnung charakteristischer Umströmungsgebiete nach [58]; basierend auf [73]: Stauzone (Pos. 1), Rezirkulationsgebiet oder Totwasser (Pos. 2), Nachlauf (Pos. 3), prägende Strukturen aufgerollter Wirbel in der Scherschicht (Pos. 4).....	30
Abbildung 2-6: Vergleich der longitudinalen Konzentrationsverläufe von Marotzke, von König sowie der mittleren und ungünstigsten Situation der VDI 3783 Blatt 2 für das Ausbreitungsgebiet der „Senkrechten Schlucht“ sowie das ebene, hindernisfreie Ausbreitungsgebiet .....	36
Abbildung 3-1: Problembeschreibung der kontinuierlichen Schwergasausbreitung im Tunnel.....	40
Abbildung 3-2: Modellgeometrie des Kleinversuchsstandes; Stahlröhre (Pos. 1), Aluminiumrahmengerüst (Pos. 2), Fahrbahnoberfläche (Pos. 3), Rollen (Pos. 4), Lafettenwagen (Pos. 5).....	43
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Einbauten zur Nachbildung und Erfassung der Strömung im Modellversuchsstand; Axialventilator (Pos. 1), Wechsellspannungsteller (Pos. 2), Einlauflippe (Pos. 3), Gitternetz (Pos. 4), 1D-Hitzdrahtanemometern (Pos. 5), Messverstärker (Pos. 6), A/D-Wandler (Pos. 7), PC (Pos. 8), Schienensystem (Pos. 9) .....	44
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Gaszuführung im Modellversuchsstand; Propangasflasche (Pos. 1), Schwebekörperdurchflussmesser (Pos. 2), Nadelventil (Pos. 3), poröse Fritte (Pos. 4) .....	45
Abbildung 3-5: Anordnung der Messstellen zur Gaskonzentrationsmessung im Kleinversuchsstand.....	46

Abbildung 3-6: System zur Erfassung der Gaskonzentration im Modellversuchsstand; Infrarotsensor (Pos. 1), Förderpumpe (Pos. 2), Druckgasspeicher (Pos. 3), A/D-Wandler (Pos. 4), Mesrechner (Pos. 5), Strahlpumpe (Pos. 6).....	47
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Gastransmitter PIR 7000 mit adaptierter Flowcell; Lichtquelle (Pos. 1), Interferenzfilter (Pos. 2), pyroelektrische Detektoren (Pos. 3 und Pos. 5), Reflektor (Pos. 4), IR-Strahler (Pos. 6), Adapter „Flowcell“ (Pos. 7), Schlauchanschluss (Pos. 8) .....	49
Abbildung 3-8: Diagramme zur Umrechnung der Parameter Massenstrom (links) sowie der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (rechts) von Original- zu Modellmaßstab .....	53
Abbildung 3-9: Vergleich der Strömungseigenschaften anhand der longitudinalen Profile von $u$ (oben) und $u_{RMS}$ (unten) im Modellversuchsstand ohne und mit strömungstechnischen Einbauten in einer Messhöhe von $z = 0,1625bT$ bei Ventilatornennbetrieb (basierend auf Daten aus [26]) .....	54
Abbildung 3-10: Longitudinale Profile von $u$ und $u_{RMS}$ der HDA jeweils an den Positionen $y_1 = 0,468bT$ ; $y_2 = 0,234bT$ ; $y_3 = 0$ ; $y_4 = -0,234bT$ im Modellversuchsstand in einer Messhöhe von $z = 0,075bT$ am unteren Einsatzbereich der Strömung.....	55
Abbildung 3-11: Standardabweichung $u_{RMS}$ und Turbulenzintensität $Tu$ einiger Versuche im Modelltunnel aufgetragen über die zugehörige mittlere Strömungsgeschwindigkeit $uS$ .....	56
Abbildung 3-12: Exemplarisch der Mittelung zugrundeliegender Konzentrationsverlauf über die Aufzeichnungsdauer am Beispiel der Messreihe V2018-11- 08_13:35 .....	57
Abbildung 3-13: Konvergenzverhalten der Konzentrationsmittelwerte am Beispiel der Messreihen für V2018-11-08_13:35; zeitliche Mittelung der Konzentrationen bis zum Zeitpunkt $t = i$ bezogen auf Konzentrationsmittelwert über Gesamtmessdauer .....	58
Abbildung 3-14: Aus 12 Einzelversuchen in Sk 1 gemittelte Konzentrationen: links = longitudinales Konzentrationsprofil entlang der Tunnellängsachse mit Regressionskurve; rechts oben = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung $1,5625bT$ ; rechts unten = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung $3,125bT$ .....	59
Abbildung 3-15: Aus 6 Einzelversuchen in Sk 2 gemittelte Konzentrationen: links = longitudinales Konzentrationsprofil entlang der Tunnellängsachse mit Regressionskurve; rechts oben = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung $1,5625bT$ ; rechts unten = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung $3,125bT$ .....	61
Abbildung 3-16: Longitudinale Konzentrationsprofile bei Abweichung des Volumenstroms um $\pm 2$ l/min vom Sollwert am Beispiel von Sk 1 und 2; Abweichung als Fehlerbalken dargestellt.....	64

Abbildung 3-17: Longitudinale Konzentrationsprofile bei Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit um $\pm 0,04$ m/s vom Sollwert am Beispiel von Sk 1 und 2; Abweichung als Fehlerbalken dargestellt .....	64
Abbildung 3-18: Longitudinale Konzentrationsverläufe für Kurvenschar unterschiedlicher Quellmassenströme bei Mindestgeschwindigkeit nach RABT .....	66
Abbildung 3-19: Konzentration an den axial mittigen Messpunkten (dimensionslose Quellentfernung in Klammern angegeben) bei halber Mindestgeschwindigkeit nach RABT über den Quellmassenstrom aufgetragen .....	67
Abbildung 3-20: Longitudinale und laterale Konzentrationsverläufe für Kurvenschar unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten bei $mQ = 1\lambda m kgs$ .....	68
Abbildung 3-21: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei positiver und negativer Längsneigung des Fahrbahnbodens .....	69
Abbildung 3-22: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei positiver und negativer Längsneigung des Fahrbahnbodens .....	70
Abbildung 3-23: Longitudinale Konzentrationsverläufe für den Bereich stromauf der Quelle bei Prüfung von backlayeringähnlichem Verhalten für unterschiedliche Parameterkonfigurationen sowie Neigungen der Fahrbahn; bei den Versuchen V2018-11-01_11:50 und V2018-11-01_11:56 betragen die Propankonzentrationen an allen Messpunkten $\leq 0,11$ Vol-% .....	71
Abbildung 3-24: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei Querneigen des Bodens .....	72
Abbildung 3-25: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 2 bei Querneigen des Bodens .....	73
Abbildung 3-26: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei lateral verschobener Quellposition .....	74
Abbildung 3-27: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für $mQ = 0,25\lambda m kgs$ und $U_{ccT} = 2\lambda Ums$ bei lateral verschobener Quellposition .....	75
Abbildung 3-28: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei erhöhter Quelle .....	76
Abbildung 3-29: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei erhöhter Quelle .....	76
Abbildung 3-30: Vergleich des longitudinalen Konzentrationsverlaufs bei erhöhter Quelle und Anheben der Strömung von Sk 2 auf $U_{ccT} = 3\lambda Ums$ .....	77
Abbildung 3-31: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei stromauf in unterschiedlichem Abstand $xiH$ zur Quelle platziertem Würfelhindernis ( $aiH = 0,2bT$ ) .....	78
Abbildung 3-32: Longitudinaler Konzentrationsverlauf bei einem im Abstand von $xiH = 0,25bT$ stromauf von Quelle platziertem Würfelhindernis und $U_{ccT} = 1\lambda Ums$ unter Variation der Freisetzungsrates .....	79
Abbildung 3-33: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei stromauf in unterschiedlichem Abstand $xiH$ zur Quelle platziertem Würfelhindernis ( $aiH = 0,2bT$ ) .....	80

Abbildung 3-34: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei stromab in unterschiedlichem Abstand $x_iH$ zur Quelle platziertem Würfelhindernis..	82
Abbildung 3-35: Longitudinaler Konzentrationsverlauf bei einem im Abstand von $x_iH = 0,25bT$ stromab von der Quelle platzierten Würfelhindernis und $U_{ccT} = 1\lambda U_{ms}$ unter Variation der Freisetzungsrates .....	83
Abbildung 3-36: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei Erhöhung der Hindernisanzahl $H$ (Hindernisanordnung nach Anhang A4) .....	84
Abbildung 3-37: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei Erhöhung der Hindernisanzahl $H$ (Hindernisanordnung nach Anhang A4) .....	84
Abbildung 3-38: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei axialem Versetzen der stauähnlichen Anordnung aus acht Einzelhindernissen .....	85
Abbildung 3-39: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 2 bei axialem Versetzen der stauähnlichen Anordnung aus acht Einzelhindernissen .....	85
Abbildung 3-40: Longitudinaler Konzentrationsverlauf bei stauähnlicher Anordnung aus acht Einzelhindernissen für Sk 2 und bei Anheben der Strömungsgeschwindigkeit.....	86
Abbildung 3-41: Konzentration für hindernisfreie Versuche in den Entfernungen $x_{QIR110} = 0,52bT$ , $x_{QIR310} = 1,5625bT$ und $x_{QIR610} = 3,125bT$ über $FrD$ aufgetragen .....	89
Abbildung 3-42: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für ausgewählte hindernisfreie Versuche mit unterschiedlichem $FrD$ -Verhältnis.....	90
Abbildung 3-43: Konzentration für hindernisfreie Versuche in den Entfernungen $x_{QIR112} = 0,52bT$ , $x_{QIR312} = 1,5625bT$ und $x_{QIR612} = 3,125bT$ über $FrDT = FrD \cdot bt/LQ$ aufgetragen .....	91
Abbildung 3-44: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für die Konfigurationen der hindernisfreien, ebenen Platte sowie der Senkrechten Schlucht entsprechend verschiedener Messdaten aus der Literatur .....	92
Abbildung 3-45: Vergleich von Literaturdaten für dimensionslose Entfernungen bei unterschiedlichen Konzentrationsverhältnissen kontinuierlicher Freisetzungen .....	93
Abbildung 3-46: Longitudinale Konzentrationsverläufe für Auswahl hindernisfreier Versuche der Messkampagne im Modelltunnel sowie zum Vergleich Daten aus Windkanaluntersuchungen nach [66, 72] .....	94
Abbildung 3-47: Nomogramm für $L_{ccT} = fFrDT$ der longitudinalen Konzentrationsverteilung für kontinuierliche Freisetzungen schwerer Gase in einer hindernisfreien, längsdurchströmten Tunnelumgebung.....	96
Abbildung 4-1: 3D-CAD-Darstellung des Großversuchsstandes (Geometriebeplanung ausgeblendet); Messwarte (Pos. 1), Betonwand (Pos. 2), Rundstahlbogen (Pos. 3), Folie mit Rastermarkierung (Pos. 4), Ventilator (Pos. 5),	

	Doppelstegplatten (Pos. 6) Netz mit Maschenweite von 10 mm (Pos. 7), Versorgungseinrichtung und Unterstand für Messequipment (Pos. 8) .....	97
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung der Quellversorgungseinheit mit Quellgeometrie; Puffergefäß (Pos. 1), 200-bar-Stickstoffflasche (Pos. 2), piezoresistiver Druckaufnehmer (Pos. 3), Waage (Pos. 4), Waagen- Auswerteeinheit (Pos. 5), Quellgeometrie (Pos. 6).....	100
Abbildung 4-3:	Mittelwert (oben) und Standardabweichung (unten) der longitudinalen Strömungsgeschwindigkeit im Großversuchsstand bei 100 % der Ventilatorleistung; * Messposition durch Quelleinrichtung verdeckt.....	105
Abbildung 4-4:	Entwicklung der momentanen Freisetzungsrates über die Versuchsdauer bei Großversuch VO2019-01-09 (mittlere Freisetzungsrates von 49,6 g/s über angenommenen Bereich annähernd konstanter Freisetzungsrates von ca. 380 s).....	106
Abbildung 4-5:	Entwicklung der freigesetzten Gesamtmasse, der flüssig freigesetzten Masse sowie des daraus berechneten Flüssiganteils am Gesamtmassenstrom über die Freisetzungsdauer im Großversuch VO2019-01-09 (Flaschenstützdruck von 6 bar, Umgebungstemperatur von 3 °C) .....	107
Abbildung 4-6:	longitudinaler Konzentrationsverlauf im Kleinversuchsstand bei $U_{ccT} =$ $0,5\lambda m$ und $mQ = 25\lambda m \cdot 10^{-3} kg/s$ für a) hindernisfreies Modellgebiet und b) Modellgebiet mit Würfelhindernis an $xiH = 0,25bT$ stromauf der Quelle .....	110
Abbildung 4-7:	Momentaufnahmen der Propanausbreitung im hindernisfreien Großversuchs VO2019-01-16_2 von Stromab aus gesehen (obere Abbildung) sowie aus der Vogelperspektive (untere Abbildung); (1) Aufwallbereich des Nebels, (2) Parabelförmige Grenze des Nebels stromauf, (3) Ort maximaler axialer Ausbreitung des Nebels stromauf, (4) Wirkungsbereich von Wirbel, (5) ungefähre Grenze kompakten Nebels stromab, (6) abgelöste Nebelschwaden stromab; regelmäßiges Raster aus weißen Linien am Boden mit Abstand 0,25 m x 0,25 m.....	113
Abbildung 4-8:	Exemplarischer Verlauf der Konzentration über die Aufzeichnungsdauer im Großversuch am Beispiel des Sensors QIR110 in Versuch V2018-12- 12_1.....	114
Abbildung 4-9:	Longitudinale Konzentrationsverläufe für die Großversuche bei hindernisfreiem Versuchsgebiet; oberer Bereich = rot markiert, unterer Bereich = grün markiert .....	115
Abbildung 4-10:	Longitudinale Konzentrationsverläufe für die Großversuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an $xiH = 0,25bT$ stromauf der Quelle .....	117
Abbildung 4-11:	Maßstäblicher Vergleich der gemittelten longitudinalen Konzentrationsverläufe für Versuche im hindernisfreien Modellgebiet sowie für Versuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an $xiH = 0,25bT$	

stromauf der Quelle zwischen den Experimenten im Maßstab 1:1 und 1:12 .....	118
Abbildung 4-12: Maßstäblicher Vergleich der gemittelten Konzentrationen lateral bei $x = 1,5625bT$ für Versuche im hindernisfreien Modellgebiet (links) sowie für Versuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an $xiH = 0,25bT$ stromauf der Quelle (rechts) zwischen den Experimenten im Maßstab 1:1 und 1:12 .	119
Abbildung 4-13: Streudiagramm der Konzentrationen in maßstabsgleichen Quellentfernungen im Original- und im Modellmaßstab für Versuche im hindernisfreien Modellgebiet (links) sowie für Versuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an $xiH = 0,25bT$ stromauf der Quelle (rechts) .....	119
Abbildung 4-14: Vergleich der gemessenen Konzentrationen im Großversuch bei hindernisfreiem Modellgebiet mit dem sich aus dem tunnelspezifischen Nomogramm für die Konfiguration ergebenen, prognostizierten Verlauf der longitudinalen Konzentrationen .....	127
Abbildung A-1: Innenansicht des tunnelförmigen Versuchsgebiets mit mittig von der Firste abgespannten HDA und Ventilator im Hintergrund .....	153
Abbildung A-2: Außenansicht des Modellversuchsstands samt vollständiger Peripherie und Messplatz.....	153
Abbildung A-3: Anordnung der Quaderhindernisse auf Bodenplatte bei Staukonfiguration 1 bis 6 .....	154
Abbildung A-4: longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei Freisetzung von Propan 2.5 (in kleinmaßstäblichen Versuchen freigesetzt) und Propan nach DIN51622 (in Großversuchen verwendet) .....	155
Abbildung A-5: Technische Zeichnung Großversuchsstand .....	156
Abbildung A-6: Mittelwert (oben) und Standardabweichung (unten) der lateralen Strömungsgeschwindigkeit im Großversuchsstand bei 100 % der Ventilatorleistung .....	157
Abbildung A-7: Mittelwert (oben) und Standardabweichung (unten) der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit im Großversuchsstand bei 100 % der Ventilatorleistung .....	158
Abbildung A-8: Schematische Darstellung des Füllstands bei angeschlossener Quellversorgungseinrichtung; Puffergefäß (Pos. 1), Füllventilinsel (Pos. 2), Gasflaschenhalterung (Pos. 3), Heizmanschette (Pos. 4).....	159
Abbildung A-9: Quellpositionen (schwarz gefüllter Kreis) und Konzentrationsmessstellen im Großversuch.....	161
Abbildung A-10: Umgebungstemperatur und relative Feuchte in der Versuchsgeometrie des Großversuchsstands im Zeitraum 10. bis 20. Dezember 2018 .....	199
Abbildung A-11: Umgebungstemperatur und relative Feuchte in der Versuchsgeometrie des Großversuchsstands im Zeitraum 09. bis 18. Januar 2019 .....	200

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: STK für ausgewählte Gase nach [5] bei 101,3 kPa und 293 K (* bei 297 K).....	11
Tabelle 2-2: Richtung des Auftriebsvektors in Abhängigkeit des Dichteverhältnisses der Medien .....	12
Tabelle 3-1: Differenz der Propankonzentration in Vol-% zwischen Versuchen bei Fehljustage zu Konzentration bei Sollwert der Betriebsparameter Volumenstrom bzw. Strömungsgeschwindigkeit an axialen Messpositionen.	63
Tabelle 3-2: Propankonzentration an erhöhter Messposition in Entfernung $x_{QIR110} = 0,52bT$ sowie $x_{QIR510} = 2,6bT$ für Sk 1 und 2 .....	65
Tabelle 3-3: Propankonzentration an erhöhter Messposition für Sk 1 und 2 mit Würfelhindernis stromauf der Quelle an $x_{iH} = 0,25bT$ .....	81
Tabelle 4-1: Gültige Versuche der Messkampagne im Großversuchsstand (vollständige Angaben in Anhang A16).....	111
Tabelle 4-2: Absolute Differenz in Vol-% sowie prozentuale Abweichung der Konzentrationen von Modellmaßstab zum Originalmaßstab bei a) Hindernisfreiheit des Modellgebiets und b) mit Anwesenheit des Würfelhindernisses.....	120
Tabelle 4-3: Prozentuale Abweichung der Konzentrationen für i) Mittelwert im Modellmaßstab zu temperaturkorrigiertem Mittelwert im Originalmaßstab sowie ii) ungünstigste Ausbreitungssituation im Modellmaßstab zu temperaturkorrigiertem Mittelwert im Originalmaßstab bei a) Hindernisfreiheit des Modellgebiets und b) mit Anwesenheit des Würfelhindernisses.....	122
Tabelle 4-4: Konfidenzniveau für Testwert $tp$ bei Signifikanztest der i) unkorrigierten sowie ii) temperaturkorrigierten gemittelten Konzentrationen von Modellmaßstab zum Originalmaßstab bei a) Hindernisfreiheit des Modellgebiets und b) mit Anwesenheit des Würfelhindernisses.....	124
Tabelle 4-5: Änderungen der Absolutwerte der Konzentration in Vol-% durch Einführen von Würfelhindernis ins Modellgebiet im Kleinversuchsstand (Maßstab 1:12) und im Großversuchsstand (Maßstab 1:1) sowie maßstabsübergreifend prozentuale Abweichung bezogen auf Originalmaßstab .....	126
Tabelle A-1: Regressionskoeffizienten der Hitzdrahtanemometer .....	150
Tabelle A-2: Sensorzuordnung zu Konzentrationsmessstellen im Groß- sowie Modellversuchsstand .....	162
Tabelle A-3: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Standardabweichung an den Messpositionen $y_1 = 0,468bT$ ; $y_2 = 0,234bT$ ; $y_3 = 0$ ; $y_4 = -0,234bT$ in einer Höhe $z = 0,075bT$ für unterschiedliche axiale Positionen $x$ sowie daraus gemittelte Strömungsbedingungen im Modelltunnel .....	164

Tabelle A-4: Übersicht der Versuche zur Untersuchung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und Standardabweichung an den Messpositionen $x_1 = -0,625bT$ ; $x_2 = 0$ ; $x_3 = 1,5625bT$ ; $x_4 = 3,125bT$ sowie daraus gemittelte Strömungsbedingungen im hindernisfreien Modelltunnel; <sup>1</sup> kein entsprechender Ausbreitungsversuch durchgeführt; <sup>2</sup> entnommen aus [26].....	165
Tabelle A-5: Übersicht der Versuche zur Untersuchung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und Standardabweichung an den Messpositionen $x_1 = -0,625bT$ ; $x_2 = 0$ ; $x_3 = 1,5625bT$ ; $x_4 = 3,125bT$ im hindernisbehafteten Modelltunnel; Werte in () als Vielfache von $b_T$ .....	166
Tabelle A-6: Übersicht der Versuche im Modelltunnel - Parameterwerte und Versuchsergebnisse; Werte in () als Vielfache von $b_T$ ; <sup>1</sup> Messergebnisse in erhöhter Position; <sup>2</sup> Wert fehlerhaft, da Hindernis Absaugung verdeckt; <sup>3</sup> Entsprechende Strömungsbedingungen in Tabelle A-4 aufgeführt; <sup>4</sup> negatives Vorzeichen = stromauf/ luvseitig der Quelle; * Versuche zur Mittelwertbildung von Sk 1; ** Versuche zur Mittelwertbildung von Sk 2; + Versuche zur Mittelwertbildung von hindernisfreier Verifizierungskonfiguration; ++ Versuche zur Mittelwertbildung von Verifizierungskonfiguration mit Hindernis.....	170
Tabelle A-7: Parameterwerte der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs auf Basis von Exponentialfunktion $c_1x = c_0 + a_0 \cdot e - xk_0$ mit $c_0 = 0 \text{ Vol-\%}$ , $a_0 > 0 \text{ Vol-\%}$ , $k_0 > 0$ und $c_0 + a_0 \leq 100 \text{ Vol-\%}$ .....	173
Tabelle A-8: Parameterwerte der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs auf Basis von Exponentialfunktion $c_2x = c_0 + a_0 \cdot e - xk_0$ mit $c_0 \geq 0 \text{ Vol-\%}$ , $a_0 > 0 \text{ Vol-\%}$ , $k_0 > 0$ und $c_0 + a_0 \leq 100 \text{ Vol-\%}$ .....	176
Tabelle A-9: Parameterwerte der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs auf Basis von Exponentialfunktion $c_3x = a_0 \cdot e - xk_0 + a_1 \cdot e - xk_1$ mit $a_0 > 0 \text{ Vol-\%}$ , $a_1 \neq 0 \text{ Vol-\%}$ und $k_0 > 0$ , $k_1 \neq 0$ .....	179
Tabelle A-10: Aus Regressionskurven berechnete Nomogrammparameter für $x/LccT$ bei $FrDT$ .....	182
Tabelle A-11: Parameterwerte der Regression der Potenzfunktionen $x/LccTcm/$ $c_0, FrDT = A \cdot FrDT - B$ .....	183
Tabelle A-12: Datenüberischt zu Versuch VO2018-12-11.....	184
Tabelle A-13: Datenüberischt zu Versuch VO2018-12-12_1 .....	185
Tabelle A-14: Datenüberischt zu Versuch VO2018-12-12_2 .....	186
Tabelle A-15: Datenüberischt zu Versuch VO2018-12-13.....	187
Tabelle A-16: Datenüberischt zu Versuch VO2018-12-18.....	188
Tabelle A-17: Datenüberischt zu Versuch VO2018-12-20.....	189
Tabelle A-18: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-09.....	190
Tabelle A-19: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-10_1 .....	191

Tabelle A-20: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-10_2 .....	192
Tabelle A-21: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-11_1 .....	193
Tabelle A-22: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-11_2 .....	194
Tabelle A-23: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-16_1 .....	195
Tabelle A-24: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-16_2 .....	196
Tabelle A-25: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-18_1 .....	197
Tabelle A-26: Datenüberischt zu Versuch VO2019-01-18_2 .....	198

# Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

## Lateinische Symbole

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erklärung</b>
$a_0$	–	Amplitude der Regressionsgleichung
$a_p$	–	Irrtumswahrscheinlichkeit
$A_T$	$m^2$	Tunnelquerschnitt
$b$	$m$	Breite
$c$	Vol-%	Volumenkonzentration
$c_0$	–	Konzentrationskonstante der Regressionsgleichung
$c_i$	Vol-%	Isotherme Volumenkonzentration
$c_{ni}$	Vol-%	Nicht-Isotherme Volumenkonzentration
$C_0 - C_4$	–	Regressionskoeffizienten der HDA-Kalibrierung
$C_{PIR0-1}$	–	Regressionskoeffizienten der HDA-Kalibrierung
$c_{PIR\_C3H8}$	Vol-%	Propankonzentration bei PIR-Kalibrierung
$d$	$m$	Optische Länge der Messstrecke der Messküvette
$d_{neu}$	$m$	Optische Länge der Messstrecke der Messküvette mit Flowcell-Adapter
$E_{HDA}$	$V$	Heizspannung der Hitzdrahtanemometer
$E_{PIR}$	$V$	Spannungssignal bei PIR-Kalibrierung
$E_{z,min}$	$J$	Mindestzündenergie des zündempfindlichsten Brenngas-/Luft-Gemisches
$Fr$	–	Froudezahl
$Fr_D$	–	Densimetrische Froudezahl
$Fr_{DT}$	–	Tunnelbreitebezogene densimetrische Froudezahl
$g$	$m/s^2$	Fallbeschleunigung
$g_{eff}$	$m/s^2$	Effektive Fallbeschleunigung
$h$	$m$	Höhe
$H$	–	Hindernisanzahl
$I_0$	$cd$	Intensität des ausgesendeten Lichtes
$I_1$	$cd$	Intensität des empfangenen Lichtes
$k_0$	–	Exponentialkonstante der Regressionsgleichung
$l$	$m$	Länge
$L_c$	$m$	Charakteristische Länge
$m$	$kg$	Freigesetzte Masse
$M$	$kg/mol$	Molare Masse

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erklärung</b>
$\dot{m}_{Q,gas}$	$kg/s$	Freigesetzter gasförmiger Massenstrom der Quelle
$\dot{m}_{Q,gesamt}$	$kg/s$	Freigesetzter Gesamtmassenstrom der Quelle
$n$	–	Stichprobengröße
$N$	–	Anzahl der Messwerte
$p$	$Pa$	Druck
$P$	–	Anzahl der unabhängigen Regressionsvariablen
$p_{stütz}$	$Pa$	Flaschenstützdruck
$Q$	[ ]	Dimensionsbehaftete Größe
$Q_x$	[ ]	Dimension der Basisgröße $X$
$R$	$J/(mol \cdot K)$	Allgemeine Gaskonstante
$R^2$	–	Bestimmtheitsmaß der Regression
$R_{cor}^2$	–	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß der Regression
$Re$	–	Reynoldszahl
$Re_T$	–	Tunnelbezogene Reynoldszahl
$Re_Q$	–	Quellbezogene Reynoldszahl
$s_d$	–	Gewichtete Standardabweichung zweier Stichproben
$t$	$s$	Zeit
$t_p$	–	Probabilistischer Testwert nach Student
$T$	$K$	Temperatur
$T_U$	$K$	Umgebungstemperatur ( $\cong 293 K$ )
$T_z$	$^{\circ}C$	Mindestzündtemperatur des zündempfindlichsten Brenngas-/Luft-Gemisches
$Tu$	–	Turbulenzintensität
$U_c$	$m/s$	Charakteristische Strömungsgeschwindigkeit
$u_{HDA}$	$m/s$	Messwert der Strömungsgeschwindigkeit der HDA
$u_S$	$m/s$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel
$u_{RMS}$	$m/s$	Standardabweichung der Strömungsgeschwindigkeit
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$x, y, z$	$m$	Kartesische Koordinaten
$x_E$	$m$	Axiale Entfernung vom Eingangsportal

## Griechische Symbole

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erklärung</b>
$\alpha \dots \eta$	–	Exponent der Dimension der Basisgrößen
$\alpha_T$	%	Längsneigung der Fahrbahn im Tunnel
$\beta_T$	%	Querneigung der Fahrbahn im Tunnel
$\Delta$	–	Differenz
$\Delta t_Q$	s	Dauer der Stofffreisetzung
$\varepsilon_\nu$	1/m	Absorptionskoeffizient bei der verwendeten Wellenlänge $\nu$
$\Theta$	–	Hindernisporosität
$\lambda_L$	–	Geometrischer Skalierungsfaktor
$\lambda_T$	–	Skalierungsfaktor der Zeit
$\lambda_U$	–	Skalierungsfaktor der Strömung
$\lambda_{\dot{m}}$	–	Skalierungsfaktor des Massenstroms
$\mu$	kg/(m · s)	Dynamische Viskosität des Fluids
$\nu$	m	Wellenlänge
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Fluiddichte
$\rho_{C_3H_8}$	kg/m <sup>3</sup>	Propangasdichte
$\rho_{gas}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der gasförmigen Stoffbeimengung
$\rho_{luft}$	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte
$\varphi$	%rF	Relative Luftfeuchte
$\phi$	–	Dichteverhältnis
$\chi$	–	Lokale Verdünnung

## Indizes

<b><i>Zeichen</i></b>	<b><i>Bedeutung</i></b>
<i>ziel</i>	Zielwert
<i>c</i>	Charakteristisch
<i>cc</i>	Charakteristisch kontinuierlich
<i>ccT</i>	Charakteristisch kontinuierlich Tunnel
<i>H</i>	Hindernis
<i>i</i>	Laufindex
<i>mess</i>	Messwerte
<i>Modell</i>	Modellmaßstab
<i>Original</i>	Originalmaßstab
<i>Q</i>	Quelle
<i>RMS</i>	Standardabweichung
<i>S</i>	Strömung
<i>T</i>	Tunnel
<i>W</i>	Wind
$\bar{x}$	Zeitlicher Mittelwert der Größe $x$
$x'$	Einzelwert der Größe $x$

## Abkürzungen

### **Zeichen**    **Erklärung**

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
ADR	Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BM	Britter & McQuaid
BMW	Bayerische Motorenwerke AG
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH <sub>2</sub>	Compressed Hydrogen
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsche Institut für Normung e.V.
DME	Dimethylether
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GGVS	Gefahrgutverordnung Straße
HDA	Hitzdrahtanemometer
HSE	Health and Safety Executive
LH <sub>2</sub>	Liquefied Hydrogen
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MP	Messpunkt
OEG	Obere Explosionsgrenze
PC	Personal Computer
Pkw	Personenkraftwagen
QRA	Quantitative Risikoanalyse
RABT	Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
Sk	Standardkombination
STK	Sicherheitstechnische Kenngrößen
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TNO	Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung
TTS	Testgelände Technische Sicherheit

***Zeichen***    ***Erklärung***

UEG        Untere Explosionsgrenze

USAM      Ultraschallanemometer

UZD        Untere Zünddistanz

VCE        Vapour cloud explosion

VDE        Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

VDI        Verein Deutscher Ingenieure e.V.

WSL        Warren Spring Laboratory

ZTV-ING    Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Von elementarer Bedeutung für das Funktionieren moderner Gesellschaften ist eine intakte und den Erfordernissen der Beförderung von Personen sowie des Transports von Waren und Gütern angepasste Verkehrsinfrastruktur. Neben der Verfügbarkeit von Verkehrswegen ist dabei die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer auf den zur Verfügung gestellten Verkehrswegen maßgebend. Besonders hohe Ansprüche an die Sicherheit sind, wie sich an den bedauerlichen Folgen von Unfallereignissen in der jüngeren Vergangenheit zeigte (bspw. *Mount-Blanc-Tunnel 1999*, *Tauerntunnel 1999*, *Gotthardtunnel 2001*, für eine Übersicht siehe [79]), an die neuralgischen Punkte im Verkehrsnetz, wie sie Brücken und Tunnelbauwerke darstellen, zu stellen.

Der Kraftfahrzeugsektor ist derzeit in einem tiefgreifenden, strukturellen Wandel begriffen. Anlass gibt der signifikante Anteil des Verkehrs am weltweiten Ausstoß treibhausgasförderlicher Emissionen, dessen Minimierung absehbar zur Diversifizierung der für den Antrieb von Kraftfahrzeugen genutzten Energieträger führen wird. Hiermit verändern sich nicht nur die im Straßenverkehr befindlichen Verkehrsmittel selbst, sondern ebenso die Ausgangsbedingungen, die im Rahmen der Sicherheitsbetrachtung von Verkehrswegen zugrunde gelegt werden müssen (vgl. [48]). Diese Entwicklung ist konsequent sicherheitstechnisch zu begleiten unter der Maßgabe, dass unabhängig von der gewählten Antriebstechnologie und den verwendeten Energieträgern das derzeit auf den Verkehrswegen erreichte Sicherheitsniveau auch zukünftig erhalten bleibt.

Alternative fluide Energieträger zu den heute noch flächendeckend eingesetzten Otto- und Dieselmotoren sind unter anderem unter Normalbedingungen gasförmige Gemische von Kohlenwasserstoffen wie Autogas und Erdgas oder reine Stoffe wie Dimethylether und Wasserstoff, die alle aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften eine saubere Verbrennung zeigen. Wasserstoff besitzt zudem das Potential, in absehbarer Zeit als „Brennstoff“ in Brennstoffzellen große Verbreitung zu erlangen. Alle genannten Stoffe eint unter anderem ihre Eigenschaft der Entzündbarkeit.

Die größte Gefahr, die im Zusammenhang mit brennbaren Gasen im Verkehrsraum besteht, geht von der unfallbedingten Beschädigung der für ihre Beförderung verwendeten Behälter aus, welche zur Freisetzung der gespeicherten Gase in die Umgebung führt. Die Folge ist die Bildung einer explosionsfähigen Brenngas-Luft-Atmosphäre, die sich bei Anwesenheit einer Zündquelle – von deren Vorhandensein im Verkehrsraum stets ausgegangen werden muss – unter Freisetzung von Wärme chemisch umsetzt und gegebenenfalls zu einer Druckwirkung führt. Die Abschätzung des

Schadensausmaßes, welches sich dadurch potentiell ergibt, sollte möglichst Eingang in die Sicherheitsbetrachtung von Verkehrswegen erhalten, setzt aber unter anderem zwingend die Kenntnis des Ausbreitungsverhaltens voraus.

Von Interesse sind diesbezüglich die Speicherbedingungen der Gase im Fahrzeug. Im Sinne eines effizienten Transports ist eine möglichst hohe reale, volumetrische Speicherdichte erstrebenswert. Als Folge dieser Zielstellung ist die Tendenz zur Speicherung und Beförderung der Gase im flüssigen Aggregatzustand wahrnehmbar, welcher je nach Gasart und deren spezifischen Eigenschaften physikalisch entweder durch hohen Druck oder erst nach Abkühlung bis auf Siedetemperatur erreicht werden kann. Unabhängig ob bei anschließender Freisetzung in die Umgebung die verflüssigten Gase spontan verdampfen oder zunächst eine Flüssiglache bilden, aus der die Gase im Anschluss aufsteigen, besitzen jene Gase im Moment der Freisetzung unter Umständen eine höhere Dichte als Luft. Auf Gase schwerer als Luft wirkt während des Ausbreitungsvorgangs zusätzlich eine negative Auftriebskraft, die sie generell bodennah ausbreiten lässt. Die im Vordehnten erwähnten Gase sind damit nicht nur brennbar, sie können zudem in Abgrenzung zur passiven luftgetragenen Ausbreitung eine ausgeprägte Eigendynamik entwickeln, welche allgemein als Schwergasverhalten bezeichnet wird.

Die Ausbreitung einer Stoffbeimengung schwerer als Luft ist ein stark individueller, komplexer physikalischer Vorgang, der zum einen von den am Beginn der Ausbreitung stehenden, individuellen Freisetzungsbedingungen und zum anderen von den vorherrschenden Randbedingungen im Ausbreitungsgebiet bestimmt wird. Ersteres wird definiert durch die Eigenschaften und den thermodynamischen Zustand des Stoffes im Moment der Freisetzung sowie der Freisetzungsweise. Bei letzterem ist unter anderem die Kenntnis der Topologie der vorliegenden Ausbreitungsgebung, der Eigenschaften des Strömungsfeldes sowie der Anordnung etwaiger im Gebiet befindlicher Hindernisse erforderlich, wobei die Bestimmung umso komplexer wird, da gerade die Ausprägung der Strömung insbesondere von der Hindernisstruktur abhängt. Eine Verallgemeinerung der Schwergasausbreitung scheitert an dieser komplexen Wechselwirkung der Faktoren, weshalb je nach Ausbreitungsgebiet Einzelfallbetrachtungen notwendig sind.

Im Gegensatz zum Anlagenbau wurde dem Aspekt des Schwergasverhaltens brennbarer Gase bei unfallbedingter Freisetzung im Rahmen der Tunnelsicherheit bis dato nur sehr wenig Beachtung geschenkt. Gründe hierfür liegen in den unterschiedlichen Herangehensweisen zur Realisierung von „Sicherheit“ aufgrund verschiedener Rechtsgrundlagen in beiden Ingenieurdisziplinen. Während für die Anlagenplanung in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) ein deterministischer Ansatz (siehe [24]) zur Anwendung kommt, wird mit [14] im Rechtsraum der BRD bei Tunneln zuallererst und hauptsächlich ein normativ-maßnahmenorientierter Ansatz verfolgt, der vornehm-

lich bauliche Maßnahmen und Ausstattungsmerkmale umfasst, wonach definitionsgemäß angenommen wird, dass damit ein Mindestmaß an Sicherheit in Tunnelanlagen gewährleistet ist. Eine Ausnahme bildet die (vergleichsweise unspezifische) Forderung nach einem risikobasierten Vorgehen, welches bei besonderer Tunnelcharakteristik sowie zur Festlegung von Durchfahrtsbeschränkungen für Gefahrguttransporte durchzuführen ist [14]. Eine mögliche Vorgehensweise wird in [91] geschildert; spezifisch methodische Hilfestellungen gibt [79]. Zudem unterliegen Verkehrswege in der BRD, anders als bspw. in der Schweiz (vgl. [22]), nicht der hiesigen Störfallverordnung, was Betreiber von Straßentunneln von der Pflicht zur systematischen Identifizierung von hypothetischen Störfällen, deren Auswirkungen sowie der damit einhergehenden Beschreibung von Störfallablaufszenarien entbindet. Die Konsequenz hiervon ist, dass bezogen auf Schwergase weder die vom Tunnel vorgegebenen ausbreitungsspezifischen Randbedingungen im Detail noch die Ausbreitung im Gesamtsystem „Straßentunnel“ als Ergebnis der kumulierten Einflussnahme von Einzelfaktoren bekannt sind. Dies führt in den wenigen Veröffentlichungen, die hierauf im Rahmen von Risikoanalysen in Tunnelbauwerken Bezug nehmen, zu teils deutlich differierenden prognostizierten Schadensausmaßen und folgend unterschiedlichen Bewertungen der Tunnelsicherheit.

Hilfestellungen bei Auswirkungsbetrachtungen bieten Modelle. Die Wirklichkeit auf einfache Weise abstrahierende analytische wie numerische Modelle sind jedoch häufig nicht in der Lage, die vielfältigen Einflussfaktoren bei der Schwergasausbreitung wie bspw. die orografischen Gegebenheiten und nicht parametrisierbare Hindernisse adäquat zu berücksichtigen. Im Allgemeinen wird sich darum bei der Ausbreitung von Schwergasen derzeit weiterhin auf die *VDI-Richtlinie 3783 Blatt 2* bezogen, die auf Windkanalexperimenten beruht. Die Richtlinie liefert auf Grundlage des longitudinalen Konzentrationsverlaufs eine Abschätzung der Größe des zündfähigen Bereiches. Dabei beschränkt sich diese auf Ausbreitungen in atmosphärischer Strömung.

Das fehlende Systemverständnis der Schwergasausbreitung im Tunnel verhindert letztlich die Ableitung von baulichen wie betriebstechnischen Maßnahmen, wie sie zumindest theoretisch bei verkehrsinfrastrukturellen Bauwerken zur präventiven Gefahrenabwehr ergriffen werden könnten. Eine detaillierte, tunnelspezifische Analyse kann hierfür von großer praktischer Bedeutung sein, ist zum derzeitigen Zeitpunkt aber noch weitgehend ausstehend.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, die Basis für ein möglichst umfassendes Verständnis des Ausbreitungs- wie Verdünnungsverhaltens von brennbaren Gasen schwerer als Luft unter den spezifischen und wahrscheinlichsten Randbedingungen in Straßenverkehrstunneln zu schaffen.

## 1.2 Vorgehensweise und Methodenwahl

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen gründen in der Frage nach den spezifischen Einflüssen von Tunnelbauwerken auf das Ausbreitungsverhalten von in ihnen freigesetzten Schwergasen. Auch wenn moderne numerische Methoden auf Basis von *Computational Fluid Dynamics* (CFD) prinzipiell alle Anforderungen erfüllen, das Verhalten schwerer Gase detailliert nachzubilden, und bei Ausbreitungsbetrachtungen heutzutage immer stärker an Bedeutung gewinnen, wird als alleinige Untersuchungsmethodik dieser Arbeit die des Experiments gewählt. Drei Überlegungen waren hierfür entscheidend. Erstens steht die Schaffung einer Datenbasis im Vordergrund. Denn zum einen bedürfen alle abgeleiteten Modelle – eine Klassifizierung der verfügbaren Typen von Ausbreitungsmodellen ist in [80] enthalten – unabhängig von dem Realisierungsumfang, vom gewählten Ansatz, den getroffenen Annahmen und den damit verbundenen Anwendungsgrenzen grundsätzlich der Validierung, also einer Bewertung der Modellgüte an Anwendungsbeispielen, für die zuvorderst experimentelle Daten zur Verfügung stehen müssen. Zweitens wird im Kontext quantitativer Risikoanalysen (QRA) von Verkehrstunneln neben der Anzeige des allgemeinen Bedarfs einer Datenbasis (vgl. [91]) teils explizit der Wunsch nach jenen Experimenten geäußert (bspw. [53, 101]). Drittens besitzen aus Experimenten abgeleitete dimensionsanalytische Modelle einige Vorzüge, die in der einfachen Handhabung, die nur geringe spezifische Anwenderkenntnisse voraussetzt, dem eher geringen Rechenaufwand und der geringen Manipulationsanfälligkeit liegen [19]. Gegenüber komplexen CFD-Modellen besteht zudem ein gewichtiger Vorteil in der Transparenz von Eingangsdaten und Ergebnissen [19].

Die für die zielgerichtete Umsetzung der Experimente essentielle Identifizierung und Charakterisierung der tunnelspezifischen Randbedingungen erfolgt im einführenden theoretischen Teil. Diese beruhen auf einer grundsätzlichen Betrachtung der Ausbreitungs- und Verdünnungsmechanismen schwerer Gase in turbulenten Strömungen, wie ihrer wesentlichen Einflussfaktoren und einer diesbezüglich umfänglichen Analyse des Systems „Straßentunnel“ zum Zeitpunkt des Szenarieneintritts. Da nicht nur im realen Unfallgeschehen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Reihe von Fahrzeugen beteiligt sein werden, sondern Hindernisse nachgewiesen allgemein erheblichen Einfluss auf das Verdünnungsverhalten nehmen können, soll neben anderen baulich und betrieblich relevanten Aspekten die Untersuchung des Einflusses von Hindernissen in den Untersuchungsumfang mit aufgenommen werden.

Den eigentlichen Experimenten geht generell ein erheblicher konzeptioneller und organisatorischer Aufwand voraus. Insbesondere beim Einsatz gefährlicher Stoffe sind erhöhte Sicherheitsanforderungen zu berücksichtigen. Voraussetzung eines umfassenden Systemverständnisses ist ein

entsprechend umfangreicher Versuchsplan, welcher eine entsprechende Parametervariation aufweisen sollte. Im Originalmaßstab, wo mit Rücksicht auf Aufwand allenfalls wenige Versuche durchgeführt werden können, ist dieser Anspruch nur unzureichend erfüllbar. Zudem sind Versuchswiederholungen unter makroskopisch identischen Randbedingungen, die der statistischen Absicherung der Ergebnisse dienen, nur schwer realisierbar. Es wird deshalb für die Beantwortung der aufgeworfenen Fragestellung in einem ersten Schritt der in der Vergangenheit bewährte Weg aus kleinmaßstäblichen Versuchen eingeschlagen. Unter Anwendung der Dimensionsanalyse soll dazu im Rahmen der Arbeit ein Versuchsstand konzipiert sowie errichtet werden, der es zulässt, eine Reihe von tunnelspezifischen Parametern in ihrem relevanten Parameterbereich zu variieren.

Eine notwendige Bedingung für die realitätsnahe Abbildung von Vorgängen im verkleinerten Maßstab ist die Einhaltung der geometrischen wie gleichwohl der physikalischen Ähnlichkeit. Die vollständige Erfüllung aller Kriterien im Kleinmaßstab ist dabei im Allgemeinen nicht möglich. Von daher ist es stets und insbesondere bei Neukonzeption eines Versuchsstandes geboten, die Vertrauenswürdigkeit der erhaltenen Ergebnisse und funktionalen Zusammenhänge zu überprüfen. Die größte Hürde stellt hierbei die für den Vergleich notwendige Verfügbarkeit großmaßstäblicher Ausbreitungen dar. Für die atmosphärische Ausbreitung von Schwergasen wurden in der Vergangenheit eine Reihe großangelegter Experimente im Freien vornehmlich in unbebautem Gelände durchgeführt, die hierbei herangezogen werden können (Übersicht in [82]). Entsprechende tunnelspezifische Messungen liegen dagegen nicht vor.

Die Durchführung explizit jener soll den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bilden. Im Hinblick auf Repräsentativität sind zweifellos Ausbreitungen in realen Straßentunneln wünschenswert. Bestehende Straßentunnel stehen zu jenem Zweck verständlicherweise im Allgemeinen aber nicht zur Verfügung. Eine Alternative eröffnet sich mit dem Freiversuchsgelände der BAM, welches die Gelegenheit bietet, eigens einen Versuchsstand angelehnt an den im Kleinversuchsstand verwendeten Tunnelausschnitt zu errichten, in dem kontrolliert Schwergase freigesetzt werden können. Um unter anderem die Güte der Nachbildung im Kleinmaßstab bemessen zu können, soll versucht werden, den Bedingungen des Kleinversuchsstands soweit wie möglich zu entsprechen sowie Parameterkonstellationen aus dem Kleinmaßstab umzusetzen. Der Vergleich soll im Wesentlichen anhand der Verdünnungscharakteristik entlang der Tunnellängsachse erfolgen.

Die Konzentrationsmessungen in beiden errichteten Versuchsständen sollen jeweils durch Messungen der Eigenschaften der vorherrschenden Strömung im Ausbreitungsgebiet begleitet werden.

Im Ergebnis sollen sämtliche Ergebnisse zusammengeführt und bezüglich ihrer sicherheitsrelevanten Konsequenzen für Tunnelbauwerke bewertet werden. Fragen zu dem allgemein bestehenden Gefährdungsniveau, den die Verdünnung fördernden wie hemmenden Faktoren sind zu diskutieren. Abschließend sollen auf Basis der Ergebnisse und Erfahrungen, die bei der Umsetzung der beiden unterschiedlichen maßstäblichen Versuche gemacht wurden, Empfehlungen hinsichtlich der für die Zukunft zu favorisierenden experimentellen Untersuchungsmethodik für Ausbreitungen im Tunnel abgegeben werden.

### **1.3 Untersuchungsszenario**

Im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der Untersuchungen sind im Vorherein einige die Komplexität und die Vielfalt von Gasausbreitungsszenarien vereinfachende Einschränkungen vorzunehmen.

Ausgangspunkt soll die in Deutschland nach [1] am häufigsten anzutreffende Tunnelart des zweispurigen Straßentunnels in Gewölbeform ausgerüstet mit mechanischer Längslüftung – also mit Strömungsführung in Hauptachsenrichtung – bilden. Aus diesem wird idealisiert ein als charakteristisch definiertes, geradliniges Segment mit einer Länge von ca. 40 m herausgeschnitten, welches für die Versuche nachgebildet wird.

Beim Quellszenario soll es sich idealisiert um eine kontinuierliche und impulsfreie Freisetzung handeln. Dieser Auswahl liegt zum einen die Abschätzung nach [28] zugrunde, dass 90–95 % aller unfallbedingten Freisetzungen von Gasen in Tunneln kontinuierlich erfolgen, und zum anderen, dass auch beim zunächst impulsbehafteten, gasförmigen Austreten aus einer potenziellen Leckageöffnung durch den Unfall quellnah Hindernisse vorhanden sind, so dass jeder Impuls des austretenden Stromes demnach bereits in unmittelbarer Quellnähe abgebaut wird. Die etwaige Verdampfung aus einer Flüssiglache erfolgt ebenfalls annähernd impulsfrei. Dieses Szenario impliziert gleichzeitig, dass eine augenblickliche Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre direkt nach Quellaustritt ausbleibt. Der Quellstrom wird zudem als konstant über die Zeit angenommen, so dass sich mit zunehmender Freisetzungsdauer quasistationäre Ausbreitungsverhältnisse im Ausbreitungsgebiet einstellen.

Als Ausbreitungsstoff soll ausschließlich Propan als typischer Vertreter eines brennbaren Gases schwerer als Luft bei den Versuchen eingesetzt werden. Des Weiteren werden die Fahrzeughindernisse durch einfache, geometrische Formen abstrahiert.

## **2 Stand der Technik und des Wissens**

### **2.1 Brennbare Gase schwerer als Luft**

Die folgenden Ausführungen dienen dazu, die Situationen, in denen ein Schwergasverhalten bei brennbaren Gasen im Umfeld des Straßenverkehrs zu erwarten ist, zu identifizieren.

#### **2.1.1 Brennbare Gase im Straßenverkehr**

Gase, die brennbar sind, werden aufgrund dieser Eigenschaft häufig als Brennstoff in stationären sowie mobilen Anwendungen eingesetzt. Bei einigen brennbaren Gasen handelt es sich zudem um essentielle Ausgangsstoffe der chemischen Industrie, wobei ihre Brennbarkeit dabei größtenteils nur eine Begleiterscheinung ist, der es in der Handhabung zu begegnen gilt. Brennbare Gase werden im Wesentlichen durch Fahrzeuge in den Straßenverkehr eingebracht. Die Menge an mitbeförderten brennbarem Gut richtet sich dabei primär an der Frage aus, ob das Gas zum Zwecke der mobilen Nutzung an Bord – hauptsächlich in der Verwendung als mobiler Energieträger zur Erzeugung des eigentlichen Vortriebs vom Fahrzeug – mitgeführt wird oder der Transport rein passiver Natur ist, der sich aus der Notwendigkeit der Verteilung vom Ort der Produktion (Raffinerie etc.) zum Ort der Weiterverwendung bzw. Endnutzung des Stoffes ergibt. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick zu den aktuell und in naher Zukunft potentiell im Straßenverkehr anzutreffenden brennbaren Gasen gegeben werden, wobei hinsichtlich der bestehenden Fragestellung der Fokus auf die Art der technischen Speicherung und auf übliche Speichermengen gelegt wird.

##### **2.1.1.1 Brennbare Gase als Antriebsquelle im Fahrzeugverkehr**

Zum Einsatz im Bereich des Fahrzeugantriebs kommen derzeit noch zum weitaus überwiegenden Teil unter Normalbedingungen flüssige Kohlenwasserstoffe wie Otto- oder Dieselmotorkraftstoff. Als Normalbedingungen sollen hierbei die nach *DIN 1343* definierte Temperatur von  $273,15\text{ K}$  bei einem Druck von  $101325\text{ Pa}$  gelten [39]. Daneben werden seit vielen Jahren unter Normalbedingungen gasförmige Energieträger wie Flüssiggas und Erdgas für den Antrieb von Fahrzeugen genutzt. Mit einem Anteil von  $0,84\%$  am gesamten Pkw-Bestand [11] und  $0,98\%$  am Lkw-Bestand [2] Mitte des Jahres 2023 ist Ihre Verbreitung im Bundesgebiet im Vergleich zu den dominanten fossilen Flüssigmotorkraftstoffen weiterhin gering. Im Zuge der zukünftigen klimapolitischen Zielsetzung im Mobilitätssektor wird aktuell intensiv der Einsatz weiterer gasförmiger alternativer Energieträger wie Wasserstoff und Dimethylether diskutiert und erprobt.

## Flüssiggas

Ein bei konventionellen Fahrzeugen mit Ottomotor von der Betriebsweise und den Anforderungen an das Tanksystem nur mit geringem Aufwand verbundener Eingriff in bestehende Verbrennungsmotorkonzepte ist die Umrüstung auf den Antrieb mit *Flüssiggas* (englisch *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) oder auch *Autogas*). LPG ist eine Fraktion aus bereits bei geringem Überdruck verflüssigbaren, unter Normalbedingungen gasförmigen Bestandteilen von Erdölprodukten, die beim Raffinerieprozess abgeschieden werden. Während die Zusammensetzung variiert, sind die Hauptbestandteile stets Propan und Butan. Eine flüssige Speicherung bei Umgebungstemperatur und einem Überdruck bis 1 MPa in zylinder- oder torusförmigen Stahltanks mit einem Füllvolumen bis zu 200 l ist üblich. Jene Stahltanks sind hauptsächlich im hinteren, bodennahen Fahrzeugbereich verbaut. Seit einigen Jahren ist die Gesamtzahl LPG-betriebener Fahrzeuge in Deutschland wieder leicht rückläufig, unter allen gasförmigen Kraftstoffen bleibt LPG aber weiterhin am weitesten verbreitet. Aufgrund seiner großen spezifischen Verdampfungsenthalpie eignet sich reines Propan außerdem als Kältemittel in mobilen Klimaanlage, welches zum Teil in Fahrzeugen eingesetzt wird.

## Erdgas

Daneben sind erdgasbetriebene Fahrzeuge auf dem Fahrzeugmarkt erhältlich. Erdgas als in der Erdkruste vorkommendes Gasmisch variert in seiner Zusammensetzung. Je nach Lagerstätte besteht Erdgas zu 85–99 % aus Methan. Im Hinblick auf eine CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität wird erwogen, Methan zukünftig hauptsächlich auf Wegen des Power-to-Gas oder per Fermentation biologischer Abfälle synthetisch klimaneutral zu erzeugen. Prozesstechnisch ist es im Gegensatz zu LPG nicht möglich, Erdgas allein durch eine Druckerhöhung in den für den Transport präferierten flüssigen Aggregatzustand zu überführen. Praktisch wird Erdgas deshalb überwiegend in zylindrischen Druckbehältern bei einem Druck von 20 MPa gespeichert und als *Compressed Natural Gas* (CNG) vertrieben. Eine Alternative dazu stellt die Verflüssigung durch Abkühlung zu *Liquefied Natural Gas* (LNG) dar, wodurch die volumetrische Energiedichte weiter gesteigert werden kann. Von Nachteil ist dabei der hohe Energieeinsatz, den der Verflüssigungsprozess bedarf, um das Gas auf eine Medientemperatur unter den spezifischen Siedepunkt von 110 K abzukühlen. Gleichzeitig setzt die Aufrechterhaltung der Medientemperatur über den gesamten Speicherzeitraum eine aufwendige Tankkonstruktion voraus. So ist zur Minimierung des Wärmeeintrages die Tankaußenhülle üblicherweise doppelschichtig ausgeführt, während zwischen den Schichten ein Vakuum angelegt ist. Eine Aufteilung von erdgasbetriebenen Fahrzeugen bezüglich ihrer Anwendung ist bis dato wie folgt wahrzunehmen: Im mobilen Individualverkehr (Pkw) sind CNG-Systeme vorherrschend. Das Fassungsvermögen entspricht etwa dem der LPG-Behälter. Den erhöh-

ten Anforderungen an die Reichweite Rechnung tragend werden LNG-Tanksysteme dagegen vorrangig im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge favorisiert. Für Fahrzeuganwendungen sind Systeme bestehend aus zwei Einzeltanks mit je 540 l Rauminhalt erhältlich (vgl. [61]).

### **Wasserstoff**

Ein alternativer Energieträger, der eine vollständig CO<sub>2</sub>-freie Fortbewegung in Aussicht stellt, ist Wasserstoff. Neben der wie bei allen anderen brennbaren Gasen üblichen Verbrennung in einer Verbrennungskraftmaschine besteht beim Wasserstoff ein weiteres vielversprechendes Einsatzfeld als „Brennstoff“ in Brennstoffzellen. Derzeit sind einige Volkswirtschaften im Begriff, durch umfangreiche staatliche Förderprogramme den teilweisen Wandel hin zur wasserstoffbasierten Mobilität zu forcieren. Frühere technische Probleme bei der Speicherung, die mit dem Permeationsverhalten von Wasserstoff einhergehen, wie die Verflüchtigung oder die Versprödung von Werkstoffen, gelten durch geeignete Werkstoffwahl heutzutage als gelöst. Erste wasserstoffbetriebene Fahrzeuge befinden sich in Serienproduktion (bspw. Hyundai IX 35, Toyota Mirai). Ähnlich der Speicherung von Erdgas als CNG, wird Wasserstoff dabei in Druckbehältern als *Compressed Hydrogen* (CH<sub>2</sub>) bei Drücken von 35 MPa bzw. 70 MPa komprimiert gespeichert. Andere Konzepte, die in der Vergangenheit vorgestellt wurden (BMW Hydrogen 7), sehen auch für Pkw die Speicherung unter kryogenen Bedingungen im verflüssigten Zustand als *Liquefied Hydrogen* (LH<sub>2</sub>) bei Temperaturen von 20 K vor [63]. Trotz dessen, dass die Verflüssigung bereits 30 % des Energiegehalts des Wasserstoffs bedarf, wird bei der zukünftig notwendigen Verteilung von Wasserstoff von einzelnen Vertreibern ein Transport in flüssiger Form favorisiert [103]. Andere Formen der Speicherung wie Metallhydridspeicher befinden sich aktuell noch im Entwicklungsstadium.

### **Dimethylether (DME)**

Der Testbetrieb von Dieselmotoren mit Dimethylether zeigt gegenüber der Verwendung von herkömmlichem Dieselkraftstoff unter anderem eine geringere Ruß- und Stickoxidbildung sowie stark reduzierte Geräuschemission bei vergleichbarem thermischem Wirkungsgrad, weshalb DME im Bereich der Selbstzünder als vielversprechender alternativer Kraftstoff eingestuft wird [93]. Von seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften besitzt DME indes eine starke Ähnlichkeit mit Propan/ LPG. So ist es bei Normalbedingungen gasförmig und kondensiert bereits bei Zuständen leicht oberhalb vom atmosphärischen Druck. Die Speicherbedingungen sind ebenfalls mit denen von Propan/ LPG vergleichbar. Der Betrieb mit DEM befindet sich noch in der Erprobung. Aufgrund der fehlenden Verbreitung sind derzeit keine Angaben zu Speichermengen in Fahrzeugen und realen Tankausführungen verfügbar.

### 2.1.1.2 Brennbare Gase als befördertes Gefahrgut

Aufgrund ihrer Brennbarkeit erfolgt die Beförderung großer Mengen brennbarer Gase auf der Straße ausschließlich im Rahmen von Gefahrguttransporten. Vorgaben beim Transport gefährlicher Güter macht das *Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße* (ADR) [46]. Je nach nachgeordnetem Verwendungszweck erfolgt der Transport wahlweise in Einheiten aus gebündelten Druckgasflaschen oder innerhalb einer einzigen großräumigen Umschließung mit Tankfahrzeugen in verflüssigter Form. Bei Tankfahrzeugen ist der maximal zulässige Rauminhalt der Umschließung von regulatorischer Seite nicht explizit begrenzt, sondern berechnet sich indirekt nach dem zulässigen Gesamtgewicht, welches nach §34 der *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)* in Deutschland für Fahrzeugkombinationen mit mehr als vier Achsen bei 40 t liegt [18]. Der Blick auf einige am Markt erhältliche Sattelaufleger gestattet eine Abschätzung der mit einem Tankfahrzeug maximal beförderbaren Menge. Das Portfolio des Herstellers *Feldbinder* bspw. reicht bis zu Tankaufbauten mit einem Volumen von 58 m<sup>3</sup> [47], im Angebot des Herstellers *Kadatec* finden sich speziell für den Transport von Flüssiggas Behälter mit bis zu 63 m<sup>3</sup> Rauminhalt [84]. Die damit maximal transportierbare Nutzlast wird mit annähernd 26,5 t Propan angegeben, womit die mitführbare Menge um etwa zwei Größenordnungen größer ist als bei Tankeinheiten für den Fahrzeugantrieb.

### 2.1.2 Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase

Allen ausgewählten Stoffen ist gemein, dass sie brennbar sind, also mit einem Oxidator (z. B. Luft) unter Freisetzung von Energie (z. B. Wärme) reagieren können. Diese exotherme Reaktion kann dabei unter gewissen Umständen explosionsartig vonstattengehen. Jene Gaswolkenexplosion (englisch *vapour cloud explosion* (VCE)) kann bei genügender Größe – bei Verdämmung umso mehr – mit für Personen und Strukturen gefährlichen Auswirkungen verbunden sein. Im Umgang mit brennbaren Stoffen bestehen demzufolge Gefahren, die auf geeignete Weise bewertet werden müssen. Um dem angemessen zu begegnen, wurden für Gase, Dämpfe und Stäube sicherheitstechnische Kenngrößen (STK) festgelegt, anhand derer das Gefahrenpotential beurteilt werden kann. STK werden zum Großteil nach genormten Verfahren in Modellexperimenten bei atmosphärischen Bedingungen bestimmt. STK stellen dabei keine physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften dar, sondern variieren mit der Wahl der Umgebungsbedingungen, des Prüfverfahrens und der Prüfapparatur.

Auf Basis der STK werden Stoffe sodann ihrer Gefährlichkeit nach klassifiziert, aus denen bspw. die Beschränkungen und Schutzmaßnahmen beim Umgang und dem Transport (siehe ADR) abgeleitet werden. Die Wahl geeigneter STK richtet sich an den Überlegungen zum Explosionsschutz aus. Zur Beurteilung einer vorangestellten grundsätzlichen Explosionsfähigkeit von Brenngas-

Luft-Gemischen werden zuvorderst die untere (UEG) und obere (OEG) Explosionsgrenze bestimmt. Beide Kenngrößen grenzen dabei den Bereich des Mischungsverhältnisses ein, in dem die Atmosphäre aus Luft und brennbarem Gas explosionsfähig ist, wobei die Grenzen definitionsgemäß nicht dem explosionsfähigen Bereich zugerechnet werden. Als UEG wird das Verhältnis mit dem geringsten Brenngasanteil, als OEG das mit dem höchsten bezeichnet. Das Mischungsverhältnis wird in dimensionsloser Form als Quotient aus der Menge des Brenngases zur Gesamtmenge, üblicherweise in den Einheiten Vol-% oder Mol-%, angegeben.

Neben einem explosionsfähigen Mischungsverhältnis ist eine Initialenergie notwendig, um eine selbstfortschreitende Reaktion zwischen den Reaktionspartnern in Gang zu setzen. Diese Energie kann einerseits durch eine erwärmte Oberfläche zur Verfügung gestellt werden. Die Temperatur, welche an der Oberfläche für die Entzündung minimal herrschen muss, wird als Mindestzündtemperatur bezeichnet und wird als eigene STK geführt. Die Mindestzündtemperatur ist dabei von den komplexen Vorgängen des Wärmeübergangs an überströmten Flächen abhängig, weshalb ein standardisiertes Prüfverfahren erforderlich ist. Die Initialenergie kann andererseits ebenso in Form eines elektrischen Funkens bereitgestellt werden. Die Mindestzündenergie definiert hierbei die kleinste Energie eines kapazitiven Entladekreises, die für die Entzündung des zündempfindlichsten Brenngas-/Luft-Gemisches notwendig ist. Sie nimmt mit Zunahme von Druck und Temperatur ab.

In der Tabelle 2-1 sind exemplarisch die nach den momentan gültigen Bestimmungsverfahren ermittelten Werte der STK für OEG, UEG, der Zündtemperatur und der Mindestzündenergie für die Auswahl der in Abschnitt 2.1.1.1 benannten Gase aufgeführt. Die Daten wurden der Datenbank *CHEMSAFE* entnommen. Auf die Ausführung weiterer STK soll an dieser Stelle verzichtet werden, da sie für das eingangs gewählte Szenario und die Beschränkung auf das Ausbreitungsverhalten von untergeordneter Bedeutung sind. Umfassende Darstellungen zu STK und deren Bestimmungsverfahren werden in den Standardwerken zum Explosionsschutz gegeben (bspw. [30, 94]).

*Tabelle 2-1: STK für ausgewählte Gase nach [5] bei 101,3 KPa und 293 K (\* bei 297 K)*

<b>Gas</b>	<b>UEG</b>	<b>OEG</b>	<b>Mindestzündtemperatur <math>T_z</math></b>	<b>Mindestzündenergie <math>E_{z,min}</math></b>
Methan	4,4 Vol-%	17 Vol-%	595 °C	0,29 mJ
Propan	1,7 Mol-%	10,8 Mol-%	470 °C	0,24 mJ
DME	2,8 Mol-%*	24,4 Mol-%*	240 °C	k. A.
Wasserstoff	4 Vol-%	77 Vol-%	560 °C	0,02 mJ

Bei Freisetzungen, die unfallbedingt im Zuge eines Transports erfolgen, damit in Umgebungen, die nicht an den spezifischen Anforderungen des Explosionsschutzes ausgerichtet sind, ist per se sowie permanent von Bedingungen auszugehen, bei denen die Mindestzündenergie sowie die Mindestzündtemperatur überschritten werden. Auf den Straßentunnel bezogen, sei beispielsweise auf die nicht konsequent in explosionsgeschützter Weise ausgeführte Beleuchtung und Lüftungstechnik verwiesen. Des Weiteren herrschen am Auspuffstrang im Bereich der Katalysatoren von im Unfallszenario involvierten Fahrzeugen Oberflächentemperaturen um 800 °C [99]. Daraus erschließt sich, dass die Gefährdung allein am Kriterium der UEG festgemacht werden kann. Aufgrund von Ungenauigkeiten in der Abbildung von Ausbreitungsprozessen und der turbulenzbedingten starken Fluktuation der Gemischzusammensetzung werden konservativ in der Praxis bereits bei Erreichen der halben UEG explosionsfähige Atmosphären angenommen [3].

### 2.1.3 Auftreten von Schwergasverhalten

Mit der Erfassung der Stoffkonzentration kann zwar eine Aussage über die lokale Explosionsgefahr am Ort und zum Zeitpunkt der Messung getroffen werden, das zur Beurteilung der Gefährdung wichtige räumlich-zeitliche Verhalten der sich ausbreitenden Wolke ist damit aber weder beschrieben noch vorhersagbar. Hierzu ist ferner die Kenntnis der Eigenbewegung des Gases infolge hydrostatischer Auftriebskräfte erforderlich, welche das Ausbreitungsverhalten mitbestimmt. Triebkraft des Auftriebs ist ein zum Zeitpunkt der Freisetzung bestehender Dichteunterschied zwischen dem in der Gasphase freigesetzten Stoff und dem Umgebungsmedium (in diesem Fall Luft). Anhand des Dichteverhältnisses, definiert als Quotient der Gas- zur Luftdichte, kann eine einfache Unterscheidung über die Richtung der Auftriebskraft vorgenommen werden (Tabelle 2-2).

*Tabelle 2-2: Richtung des Auftriebsvektors in Abhängigkeit des Dichteverhältnisses der Medien*

<b><i>Dichteverhältnis <math>\phi = \rho_{gas} / \rho_{luft}</math></i></b>	<b><i>Richtung des Auftriebsvektors</i></b>
> 1	In Schwerkraftrichtung
~ 1	Kein Vektor vorhanden
< 1	Entgegen der Schwerkraftrichtung

Diese Arbeit soll sich ausschließlich mit Ausbreitungssituationen beschäftigen, in denen das Dichteverhältnis größer als eins ist, d. h. die Gase erfahren bei der Ausbreitung eine negative Auftriebskraft – also ein Absinken – in Richtung des Bodens. Dies wird mit dem Begriff des Schwergasverhaltens beschrieben. Ursache für den Dichteunterschied kann nach [54] sein:

1. Ein hohes Molekulargewicht des freigesetzten, gasförmigen Stoffes
2. Eine tiefe Temperatur des freigesetzten, gasförmigen Stoffes
3. Die Bildung von Aerosolwolken
4. Die Polymerisation von Stoffen

Stoffe, bei denen infolge von Punkt 3 (z. B. Ammoniak) oder 4 (z. B. Fluorwasserstoff) ein Schwergasverhalten auftritt, sind vergleichsweise selten und sollten als Sonderfälle einzeln betrachtet werden. In der Mehrzahl beruht das Schwergasverhalten auf den Punkten 1 und 2. Den Zusammenhang zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen für beide Formen des Schwergasverhaltens bildet die allgemeine Gasgleichung mit  $R$  als allgemeiner Gaskonstante:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (2.1)$$

Aus Gl. (2.1) geht hervor, dass sich die Dichte eines Gases proportional zur stoffspezifischen molaren Masse  $M$  sowie antiproportional zur Temperatur  $T$  verhält, d. h. sinkt die Temperatur des Gases, so steigt seine Dichte. Die Temperatur wird dabei in der Praxis durch die oben beschriebenen Bedingungen der technischen Speicherung determiniert, sie ist somit situativ.

Abbildung 2-1 zeigt den Verlauf des Dichteverhältnisses (bezogen auf die Dichte von Luft bei 293 K) über der Temperatur für die benannten Gase. Anhand dieser lassen sich die Situationen identifizieren, in denen ein Schwergasverhalten im Umfeld des Transports brennbarer Gase im Straßenverkehr zu erwarten ist. Vereinfacht soll hierbei angenommen werden, dass bei Freisetzung aus der Flüssigphase in der sich bildenden Gasphase die stoffspezifische Siedetemperatur vorliegt und sich die Temperatur bei der Entspannung der Gase nur geringfügig ändert.

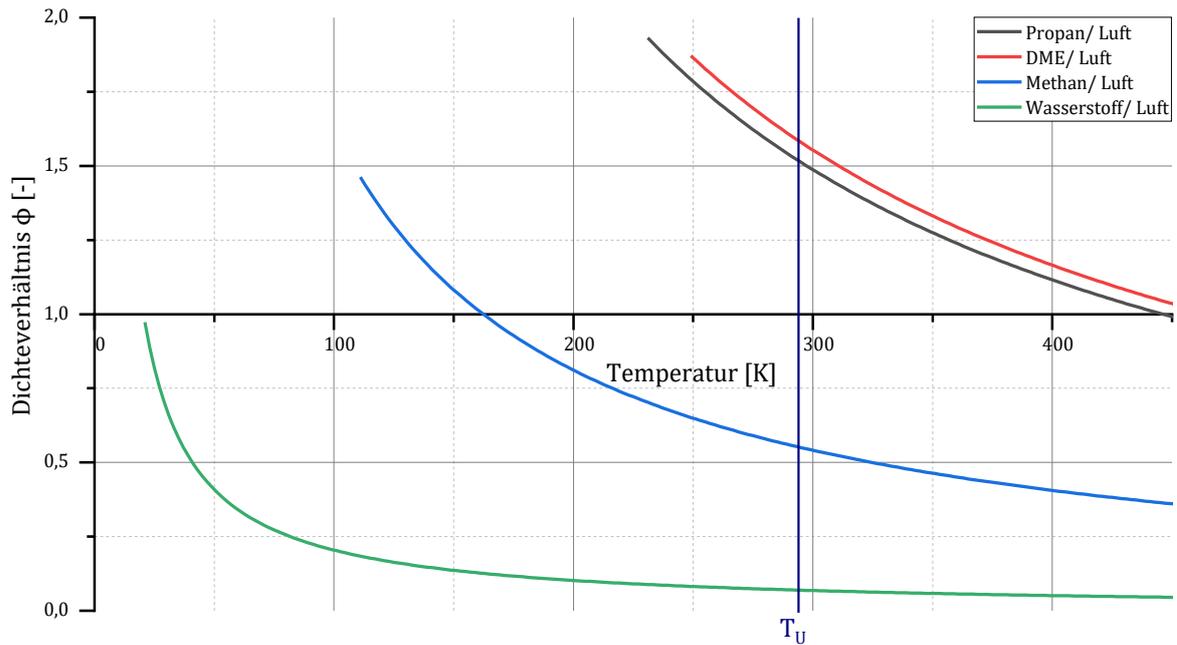


Abbildung 2-1: Temperaturabhängiges Dichteverhältnis ausgewählter brennbarer Gase zu Luft bei Normalbedingungen

Propan und DME werden ausnahmslos druckverflüssigt gespeichert. Bei ihren jeweiligen Siedetemperaturen sind sie schwerer als Luft. Bei Umgebungstemperatur ( $T_U = 293 \text{ K}$ ) weisen beide Stoffe ebenso eine höhere Dichte als Luft auf, d. h. bei ihnen handelt es sich um permanente Schwergase. Methan und Wasserstoff sind unter Umgebungsbedingungen aufgrund ihrer geringen Molekülmasse indes deutlich leichter als Luft. Bei Freisetzung aus CNG- und  $\text{GH}_2$ -Druckgas speichern ist ihr Verhalten damit stark auftriebsbehaftet. Bei Abkühlung erhöht sich ihre Dichte. Unter einer Temperatur von  $163 \text{ K}$  kehrt sich bei Methan die Richtung der Auftriebskraft um, so dass bei Siedetemperatur, wie sie bei der Freisetzung von LNG in der sich entwickelnden Brenngaswolke herrscht, ein Schwergasverhalten vorliegt. Für Wasserstoff hingegen bleibt das Dichteverhältnis auch bei Siedetemperatur knapp unter 1. Nichtsdestotrotz konnte ebenso bei freigesetzten Brenngaswolken aus  $\text{LH}_2$ -Lachen zu Freisetzungsbeginn schwergasähnliches Verhalten beobachtet werden [62, 70]. Ausschlaggebender Effekt könnte hierbei die lokale Abkühlung der mit dem Wasserstoff in Kontakt tretenden Luft sein. Durch die rasche Erwärmung der Wolke nach Freisetzung heben sich die Schwergaseffekte mit zunehmender Entfernung auf [70].

Aus dieser Analyse geht im Wesentlichen hervor, dass das Auftreten eines Schwergasverhaltens brennbarer Gase im Straßenverkehr mit der vermehrt favorisierten flüssigen Speicherung der Gase einhergeht. Die Ergründung dieses Verhaltens in einer Tunnelumgebung ist Absicht der weiteren Betrachtungen der Arbeit.

## 2.2 Ausbreitung von Gasen schwerer als Luft

Wie beschrieben ist das Charakteristikum von Gasen schwerer als Luft eine relativ zur Luft höhere Dichte. Infolge des Dichteunterschieds erfahren die Gase im Schwerefeld der Erde einen negativen Auftrieb, weshalb sich ihr Ausbreitungsverhalten insbesondere im quellnahen Bereich von dem dichteneutralen, passiv mit der Hauptströmung mittransportierter, gasförmiger Stoffe unterscheidet.

### 2.2.1 Phänomenologie der Ausbreitung schwerer Gase

#### 2.2.1.1 Die vier Phasen der Schwergasausbreitung

Das Verhalten einer Schwergaswolke wird im Wesentlichen von den folgenden in Wechselwirkung stehenden physikalischen Größen bestimmt:

- Dem Impuls der externen mittleren Luftströmung
- Dem Impuls der externen turbulenten Wirbelbewegung
- Dem Trägheitsimpuls des schweren Gases
- Dem durch die Dichtedifferenz hervorgerufenen Strömungsimpuls

*Hartwig* weist darauf hin, dass zusätzlich Reibung und durch chemische bzw. physikalische Umsetzung bedingte Energieänderungen eine Rolle spielen können [54]. Anhand der aus dieser Auflistung jeweils dominierenden Einflüsse lassen sich nach *Hunt et al.* allgemein vier phänomenologisch eigenständige Phasen (manche Autoren fassen dritte und vierte Phase auch zusammen) definieren, nach denen der Prozess der Ausbreitung bzw. Verdünnung schwerer Gase typischerweise (jedoch nicht zwingend) abläuft [59]. Dieses definieren sich u. a. nach *Hunt et al.* durch:

**Initialphase** – In der Initialphase tritt das schwere Gas zunächst aus seiner Umschließung heraus. Diese Phase ist bestimmt von den individuellen Freisetzungsbedingungen, also der Trägheit der Wolke, und dem Impuls der externen Luftströmung, in die das Schwergas eintritt. Zwischen Luftströmung und Gas findet sodann ein Impulsaustausch statt, der das Gas je nach den Quellbedingungen beschleunigt oder abbremst (bei impulsbehaftetem Austritt). Bei einem annähernd impulslos freigesetzten Gas wird die Wolke unter dem Einfluss der Luftströmung aus der Ruhe versetzt und infolge der sich einstellenden Druckunterschiede im Austrittsbereich charakteristisch – bei kontinuierlicher Freisetzung bildet sich stromab ein hufeisenförmiges Paar gegenläufiger Wirbel – verformt. Herrscht in der Umschließung ein hoher Druck, tritt das Gas indes mit hohem Eigenimpuls, und sofern keine Hindernisse vorhanden sind, in Form eines sogenannten Freistrahls (engl. Jet) aus. Der Theorie turbulenter Freistrahlen hat sich umfänglich *Abramovich* [25] gewid-

met; die Ausbreitung schwerer Freistahlen unterschiedlicher Ausrichtung in turbulenten Strömungen hat unter anderem *Donat* [40] experimentell untersucht. Unabhängig vom Austrittsimpuls des Gases sind die Trägheitseffekte so lange bestimmend, bis sich die durch den Dichteüberschuss erzeugte Strömung organisiert hat. Entsprechend gilt, sind Austrittsimpuls sowie externe Luftströmung initial nur gering (z. B. im Windschatten von Hindernissen), geht die Ausbreitung unter Auslassung der Initialphase direkt in die gravitationsgetriebene Phase über.

**Gravitationsgetriebene Phase** – In dieser Phase dominiert die negative Auftriebskraft die Ausbreitung. Schwerkraftströmungen werden in erster Linie durch den überschüssigen hydrostatischen Druck angetrieben, der durch die höhere Dichte im Vergleich zum umliegenden Fluid entsteht. Das Schwergas sinkt zu Boden, das sich in der Folge horizontal auf diesem und radial vom Quellort ausbreitet. Diese Bewegung wird überlagert von einer durch die Luftströmung initiierten horizontalen Translationsbewegung, welche die Wolke als Ganzes jedoch in dieser Phase noch mit einer signifikant geringeren Geschwindigkeit als die der Luftströmung stromab treibt. Die Wolke erhält dadurch eine in der Regel in Richtung der Luftströmung gestreckte Form. Die Turbulenz innerhalb der Wolke wird weitgehend von den Gravitationskräften bestimmt. Zu den meisten Vermischungen kommt es an der Wolkenfront. Dort bildet sich bedingt durch die starke gravitationsgetriebene bodennahe Strömung ein Rezirkulationsgebiet mit großen vertikalen Geschwindigkeiten (Frontwirbel), in dem ein kontinuierlicher Prozess der Schichtung von verdünntem und dadurch leichteren Gas über dichteres, unverdünntes Gas innerhalb der Schwergaswolke abläuft. Hinter der Wolkenfront bleibt hingegen weiterhin ein stabilisierender Dichtesprung zwischen den zwar schon etwas weniger dichten Anteilen der Wolke und der darüber strömenden im Vergleich aber weiterhin leichteren Umgebungsluft erhalten, wodurch der vertikale Turbulenzaustausch und damit eine weitere Verdünnung der Wolke gehemmt wird.

**Beinahe passive Phase** – Sobald die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Schwerkraftströmung und der externen Luftströmung so klein geworden ist, dass sie im Bereich der externen turbulenten Fluktuationen liegt, prägen immer mehr jene die turbulenten Bedingungen innerhalb der Gaswolke. Dies ist zunächst in der bereits teilgemischten oberen Schicht der Wolke der Fall, was in dieser Zone zur weiteren Verdünnung und einem verstärkten nach außen gerichteten Strom führt. Sichtbarstes Zeichen ist der kollabierende Frontwirbel, da die bodennahe gravitationsgetriebene Strömung nun nicht mehr ausreicht, die Rezirkulation an der Front aufrechtzuerhalten. Fortwährend nimmt der Kernbereich des dichten ungemischten Gases ab.

**Passive Phase** – Dieser Vorgang mündet in die vollends passive Phase. Die Stoffkonzentrationen liegen nun deutlich unterhalb von 1 Vol-%, Geschwindigkeits- und Dichteunterschiede zwischen freigesetztem Gas und der Luftströmung haben sich nahezu nivelliert und die Annahme einer pas-

siv mit der Hintergrundströmung transportierten Stoffbeimengung ist gerechtfertigt. Der Ausbreitungs- und Verdünnungsprozess vollzieht sich nun allein auf Basis der Ausprägung der externen Strömung und soll nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit sein. Der Vorgang der luftgetragenen Ausbreitung kann detailliert z. B. bei *Roberts & Webster* [83] nachvollzogen werden.

Eine klare Abgrenzung der vier Phasen ist nicht möglich, vielmehr gehen sie fließend ineinander über [89]. Zudem bemisst sich der Zeitraum, in der sich das Schwergas in der jeweiligen Phase befindet, jeweils nach der problemspezifischen Kombination der Einflussgrößen während des Ausbreitungsprozesses. Bei einer kontinuierlichen Freisetzung in hindernisfreies Gebiet, wie sie hier vorausgesetzt wird, schließen sich die Phasen im Allgemeinen in der beschriebenen Weise aneinander an. Innerhalb der quasistationären Wolke werden also gleichzeitig und permanent alle beschriebenen Phasen – nur in unterschiedlichem Abstand zur Quelle – durchlaufen.

### 2.2.1.2 Das äußere Erscheinungsbild

Das sich aus der Aneinanderreihung der Phasen sodann ergebende Längsprofil einer ungestörten, in eine externe Querströmung bodennah freigesetzten, quasistationären Schwergaswolke ist schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt. Die Initialphase (Pos. 1) besteht in unmittelbarer Quellumgebung. Im Übergang zur gravitationsgetriebenen Phase (Pos. 2) sinkt das Schwergas einer Flüssigkeit ähnlich von seiner Quellhöhe aus allseits zu Boden. Die Querströmung stellt eine Barriere stromauf dar; stromab versetzt sie die Wolke. Im sich stromab anschließenden von der Dominanz des negativen Auftriebs geprägten Bereich ist die Höhe der Schwergaswolke annähernd konstant und minimal. Erst in größerer Entfernung, mit Beginn der beinahe passiven Phase (Pos. 3), nimmt die Schwergaswolke durch verstärkte Lufteinmischung allmählich in ihrer vertikalen Ausdehnung zu.

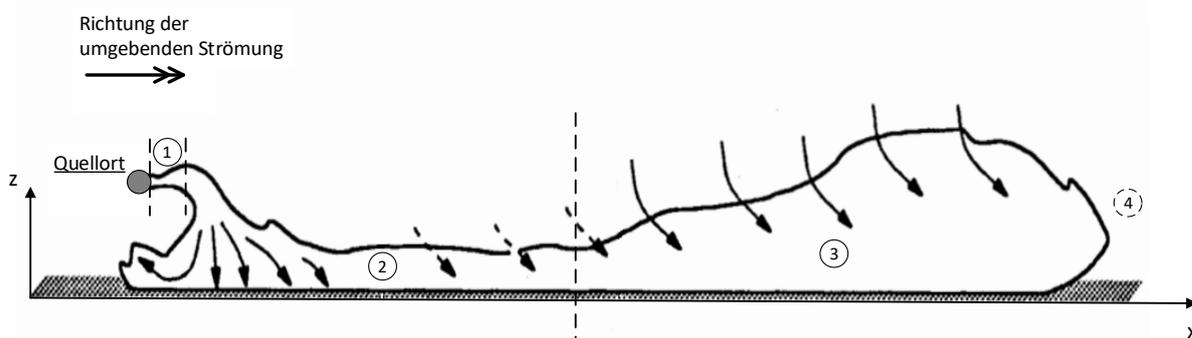


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Schwergaswolken im Längsprofil bei vorhandener Umgebungsströmung nach [38] mit Markierung der phänomenologischen Phasen der Ausbreitung: 1 - Initialphase, 2 - gravitationsgetriebene Phase, 3 - beinahe passive Phase, 4 - passive Phase

Blickt man nun von oben auf die Schwergaswolke, so formt sich in einer Strömung bedingt durch die erwähnte Überlagerung des externen Strömungsfeldes und des Strömungsfeldes der Schwergaswolke in der Regel ein paraboloidförmiges Gebilde heraus [54] (siehe Abbildung 2-3). Infolge des negativen Auftriebs wandert das Schwergas in geringem Maße auch quer zur Hauptanströmrichtung. Der vorhandene ausgeprägte Dichtesprung führt in Quellnähe zu einer scharfen Abgrenzung von der Umgebungsströmung. Frontwirbel treten am ehesten luvseitig auf. In weiter Quellentfernung mit dem Übergang in die dritte und vierte Phase ist eine klare Abgrenzung der Wolke hingegen nicht mehr möglich (in Abbildung 2-3 gestrichelt angedeutet).

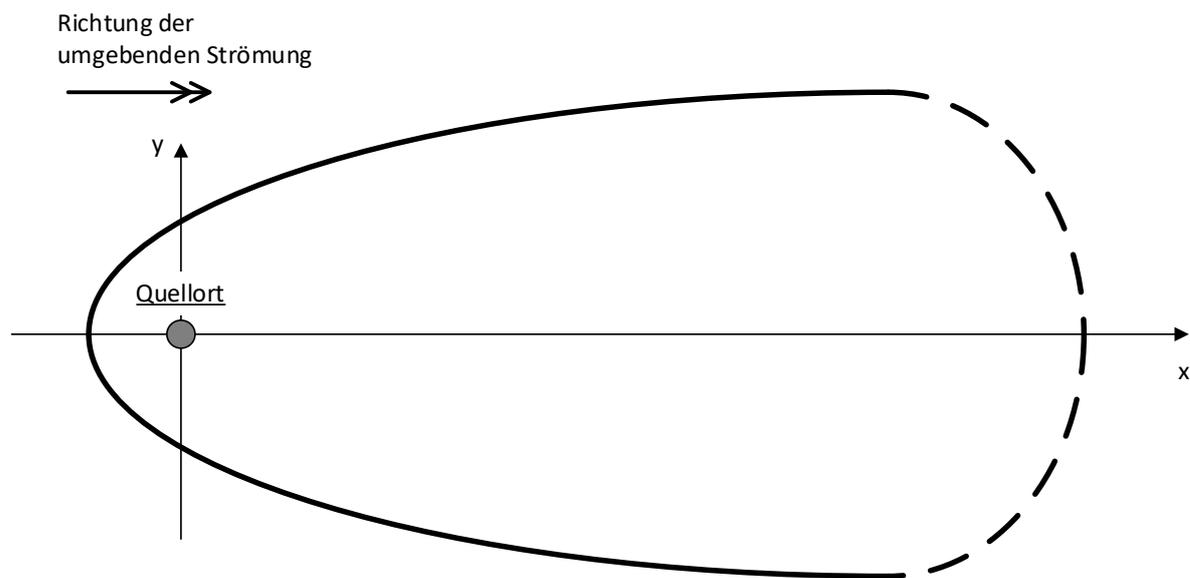


Abbildung 2-3: Verlauf der Isokontur der Konzentration (durchgezogene schwarze Linie) eines impulslos freigesetzten Schwergases bei vorhandener Umgebungsströmung in der x-y-Ebene (angelehnt an [32])

*Britter & McQuaid* leiteten hierfür aus experimentellen Beobachtungen ein Modell zur Beschreibung der ebenerdigen Konzentrationsisokonturen (= Linien gleicher Konzentration) ab [32]. Sowohl die vertikale Migration als auch der Zuwachs der Wolkenbreite entlang der leeseitigen Ausbreitung werden im Modell von *Britter & McQuaid* durch den Quelldurchmesser und durch das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerekräften (was in Form der dimensionslosen Froudezahl beschrieben werden kann) bestimmt, wobei der Einfluss des ersteren mit Quellentfernung abnimmt.

### 2.2.1.3 Die innere Zusammensetzung

Nach *Hartwig* ist das Innere der Wolke geprägt durch:

1. einen horizontal homogenen Kernbereich
2. vertikale Konzentrationsabnahme
3. laterale Konzentrationsabnahme

Die Konzentration innerhalb der Schwergaswolke kann dabei naturgemäß nur durch Einmischung der Umgebungsluft in die Wolke sinken. Bei der quasistationären bodennahen Ausbreitung ist die Einmischung nur über die Deck- und Seitenflächen möglich, wobei trotz der zuvorderst an den Seiten bestehenden Wirbel die im Vergleich deutlich größere Deckfläche den größten Beitrag liefert [54]. Die Lufteinmischung beruht auf Turbulenz. Hauptsächlich in der gravitationsgetriebenen Phase durch den bestehenden Dichtesprung an der Grenzfläche zur externen Strömung sowie der internen Schichtungsprozesse ist der Einfluss der externen Turbulenz stark vermindert. Die Fluktuationen (als Maß für Turbulenz) sind innerhalb der Schwergaswolke geringer als außerhalb [89]. Eine langsamere Verdünnung als bei rein passiver Ausbreitung ist die Folge.

Das longitudinale Konzentrationsprofil, welches Aufschluss über die innere Zusammensetzung gibt und welches im Folgenden für die Bewertung der Explosionsgefahr die Grundlage bildet, stellt sich sodann als Ergebnis aus den stromab aneinandergereihten charakteristischen Phasen der Schwergasausbreitung ein. Dieses nimmt im einfachsten Fall, der idealisiert ebenen ungehinderter Ausbreitung in atmosphärischer Strömung im halblogarithmischen Diagramm einen geradlinig abfallenden Verlauf [104].

Eine Vielzahl von Parametern, die hinter den physikalisch bestimmenden Einflussgrößen stehen, beeinflusst den Prozess der Schwergasausbreitung. Für einen Überblick über die bestehenden experimentell angelegten Sensitivitätsstudien sei auf die Fachliteratur verwiesen [32, 54, 89]. Aufgrund der mannigfaltigen Ausbreitungssituationen und -bedingungen ist eine Systematisierung an dieser Stelle schwer und nur wenige Aussagen sind allgemeingültiger Natur. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang jedoch die Feststellung, dass die Erkenntnisse beinahe durchweg unter Nachbildung einer atmosphärischen Grenzschichtströmung gewonnen wurden, weshalb ihre Gültigkeit für die Tunnelströmung a priori zu prüfen ist.

## **2.2.2 Experimentelle Methoden zur Untersuchung schwerer Gaswolken**

In Vorbereitung des experimentellen Teils der Arbeit werden im Folgenden die bestehenden klassischen experimentellen Methoden der Untersuchung der Ausbreitung schwerer Gaswolken erörtert sowie deren individuelle Vorzüge bzw. Defizite herausgestellt.

### **2.2.2.1 Experimentelle Untersuchungen im Originalmaßstab**

Vor dem Hintergrund atmosphärischer Schwergasausbreitungen gibt *Hartwig* [54] einen Überblick möglicher Arten von experimentellen Untersuchungen und bewertet deren Eignung. Diese Einschätzungen können wohl ohne größere Einschränkungen als allgemeingültig eingestuft werden. Er unterteilt hierbei prinzipiell in Experimente im Realmaßstab und Untersuchungen im verkleinerten Maßstab. Bei den Versuchen muss zudem nicht zwingend der eigentliche Ausbreitungsstoff eingesetzt werden. Auch die Umgebung kann neben den Feldexperimenten ebenso in

Windkanälen nachgebildet werden. Eine kritische Diskussion der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Realszenario wird dabei mit jeder Abweichung umso dringlicher.

Eine aktuelle Aufstellung der historisch bedeutsamen experimentellen Untersuchungen im Originalmaßstab sowie ihrer wesentlichen Merkmale wie dem Versuchsumfang und den Freisetzungsbedingungen ist in *Rauchegger* [82] gegeben. Es zeigt sich, dass Schwergasexperimente vorrangig in den 70ern und 80ern des letzten Jahrhunderts und überwiegend am Beispiel von LNG durchgeführt wurden. Freisetzungen im Originalmaßstab können als sehr aufwändig in Planung und Umsetzung angesehen werden. Sie sind äußerst zeitintensiv und erfordern eine kostspielige Infrastruktur, was sich in der geringen Anzahl verfügbarer Experimente sowie einer geringen Wiederholrate niederschlägt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist hingegen vollständig gegeben.

Problematisch bei Einzelversuchen in turbulenten Strömungen ist, dass sie jeweils nur einen Ausschnitt aus dem gesamten Ausbreitungsspektrum wiedergeben. Auch bei statistisch identischen Strömungseigenschaften gleicht sich die instantane turbulente Wirbelstruktur von Versuch zu Versuch nicht. Um den Streubereich der Ausbreitung abschätzen zu können, sollten Versuche deshalb mehrfach wiederholt werden. Aus Kostengründen sind bei Großversuchen hingegen häufig aber nur wenige, für eine statistische Aussage meist zu geringe Anzahl von Wiederholungen möglich. Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund der Abhängigkeit von natürlichen Bedingungen die Versuchsbedingungen selbst nicht wiederkehrend reproduziert werden können. Großversuche eignen sich damit eher nicht zur vertieften, systematischen Analyse von Phänomenen.

### **2.2.2.2 Experimentelle Untersuchungen in kleinmaßstäblichen Modellen**

Kleinmaßstäbliche Experimente stellen eine alternative Herangehensweise dar. Unter Anwendung der Ähnlichkeitstheorie ist es möglich, die wesentlichen die Ausbreitung charakterisierenden Bedingungen in einen kleineren Maßstab zu übertragen. Geometrische Ähnlichkeit ist bei Anwendung eines gleichmäßigen Skalierungsfaktors vergleichsweise einfach erreichbar. Vollständige physikalische Ähnlichkeit ist hingegen schwerer realisierbar und gelingt nur unter Einhaltung der den physikalischen Vorgang beschreibenden Ähnlichkeitskennzahlen, die sich z. B. aus dimensionsanalytischen Betrachtungen ergeben. Grundlegende Empfehlungen zur Umsetzung von maßstäblichen Versuchen können bspw. [29, 34] entnommen werden.

Bei der Dimensionsanalyse wird die Tatsache ausgenutzt, dass eine abgeleitete (physikalische) Größe stets als Kombination aus den sieben nach dem *Internationalen Größensystem* [17] zur Verfügung stehenden physikalischen Basisgrößen dargestellt werden kann. Entsprechend ergibt sich ihre Dimension  $Q$  aus dem Produkt der Dimensionen  $Q_m \dots Q_l$ , der Basisgrößen, wobei der Exponent  $\alpha \dots \eta$  auch stets von der Ordnung null sein kann (Gleichung (2.2)).

$$\dim Q = Q_m^\alpha \cdot Q_l^\beta \cdot Q_t^\gamma \cdot Q_I^\delta \cdot Q_T^\varepsilon \cdot Q_n^\zeta \cdot Q_{I_v}^\eta \quad (2.2)$$

Werden nun die Dimensionen der Einzelgrößen  $n$ , die für die jeweilige physikalische Problemstellung als relevant erachtet werden, in einer Dimensionsmatrix zusammengestellt, wird offenbar, dass sie sich aus einer Anzahl von  $m$  Basisgrößen ergeben. Der Matrixraum wird dann von unabhängigen Vektoren aufgespannt, den sogenannten  $\pi$ -Faktoren. Diese Faktoren sind dimensionslos und entsprechen einfachen geometrischen Skalierungen und physikalischen Ähnlichkeitsbeziehungen. *Buckingham* schlussfolgerte nun, dass jedes physikalische System auch aus  $n - m$  dimensionslosen Produkten  $\pi$  ausgedrückt werden kann. Die Herausforderung bei der Dimensionsanalyse besteht letztlich in der Identifikation aller problemrelevanten Einzelgrößen, die die Anzahl  $n$  und  $m$  festlegen, aus denen sich die dimensionslosen Kennzahlen ableiten.

Bei der Anwendung der Dimensionsanalyse auf den Ausbreitungsvorgang von Stoffbeimengungen in Luft allgemein gelangt man, je nach Wahl der Randbedingungen sowie Skale der Ausbreitung, auf eine Anzahl von Ähnlichkeitskennzahlen (Details siehe [92]), wovon zwei für das vorliegende Problem der Schwergasausbreitung wesentlich sind.

Zum einen ist, wie allgemein bekannt, bei jeglichen strömungstechnischen Fragestellungen die Reynoldszahl von zentraler Bedeutung, die eine Aussage über die Strömungsform gestattet.

$$Re = \frac{\rho \cdot U_c \cdot L_c}{\mu} \quad (2.3)$$

Mit  $\rho$  der Fluidichte,  $\mu$  der dynamischen Viskosität sowie einer das Problem charakterisierenden Strömungsgeschwindigkeit  $U_c$  als auch Länge  $L_c$  werden hierbei die fluidspezifischen Kräfte der Trägheit und Zähigkeit ins Verhältnis gesetzt. Energetisch kann sie auch als Maß der Energieproduktion zur -dissipation in der Strömung interpretiert werden und bemisst folglich, wie anfällig eine Strömung bezüglich einer eingebrachten Störung ist. Überschreitet  $Re$  einen bestimmten Wert können Störungen nicht mehr gedämpft werden und die Strömung geht vom laminaren in den turbulenten Zustand über.

Zum anderen spielt bei gravitationsgetriebenen Strömungen das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerekräften eine wesentliche Rolle, mit denen das Absinkvermögen der Strömung determiniert ist. Dies wird bei Schwergasausbreitungen üblicherweise in Form der densimetrischen Froudezahl  $Fr_D$  nach Gleichung (2.4) ausgedrückt.

$$Fr_D = \frac{U_c}{\sqrt{g_{eff} \cdot L_c}} \quad (2.4)$$

Dabei wird  $g$  in der nach Gleichung (2.5) mit der Dichtedifferenz gewichteten Form als  $g_{eff}$  verwendet, was – vorteilhaft für die Beschreibung des tatsächlichen Absinkverhaltens – direkt der realen „effektiven“ Fallbeschleunigung der austretenden Stoffbeimengung entspricht.

$$g_{eff} = g \cdot \frac{\rho_Q - \rho_S}{\rho_S} \quad (2.5)$$

Bei der Ausbreitung schwerer Gase im verkleinerten Maßstab kann die Ähnlichkeit im Allgemeinen nicht vollständig eingehalten werden. Beim Vergleich der Ausdrücke für  $Re$  und  $Fr_D$  wird, wie *Hartwig* anmerkt, schnell ein Zielkonflikt sichtbar. Da die Geschwindigkeit  $U_c$  mit der Länge  $L_c$  in einem Fall als Produkt und im anderen Fall als Quotient in die Ausdrücke eingeht, können beide Zahlen bei Skalierung nicht gleichzeitig eingehalten werden [54]. Erfreulicherweise müssen erfahrungsgemäß die Ähnlichkeiten auch nicht vollkommen erfüllt sein [20]. Es stellt sich jedoch die Frage, welche der beiden Kennzahlen für auftriebsbehaftete Strömungen eine größere Relevanz besitzt, also präferiert einzuhalten ist, womit gleichzeitig zu klären gilt, wie groß die Abweichungen der Kennzahlen sein dürfen, um die Ähnlichkeit zu erhalten. Einen Leitfaden zur Umsetzung von Schwergasversuchen in kleinmaßstäblichen Modellen gibt *Meroney* [75].

Praktisch wird häufig versucht, zuvorderst die Froudezahl einzuhalten. Diese Entscheidung fußt auf der Annahme, dass die Wirbelstrukturen bei turbulenter Strömung bei genügend hohen Reynoldszahlen unabhängig von dieser sind [96]. *Snyder* diskutiert die Auswirkungen der Abweichungen von der Reynoldszahl ausführlich: In Modellen besitzen die viskosen Kräfte demnach eine größere Bedeutung, da die Reynoldszahlen typischerweise um Größenordnungen kleiner sind. Das Turbulenzspektrum wird damit deutlich verkleinert. Es werden jedoch ausschließlich die hochfrequenten, energiearmen Wirbel, die hauptsächlich im weniger relevanten Dissipationsbereich wirken, abgeschnitten bzw. im Modell nicht nachgebildet [92].

Reynoldsunabhängigkeit wird je nach Autor und Untersuchungsgegenstand zwischen  $Re = 4000$  und  $Re = 15000$  attestiert (siehe Ausführungen in [34, 92]). Die *VDI 3783 Blatt 12* empfiehlt diesbezüglich, bezogen auf atmosphärische Grenzschichten bei der Umströmung von Hindernissen mit Ablösekanten eine Mindestreynoldszahl von  $Re = 10000$  einzuhalten [20]. Nach *Snyder* ist bei Hindernissen mit strömungsgerechterer Form die Reynoldsunabhängigkeit erst bei höheren Werten gegeben [92]. Bei Hindernissen ohne charakteristische Ablösekante verlangt die *VDI 3783 Blatt 12* dementsprechend die Umströmungsverhältnisse einzeln zu prüfen.

Unter diesen Voraussetzungen konnte bei atmosphärischen Problemstellungen in Modellversuchsständen eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Ausbreitungen festgestellt werden (vgl. [52]). Windkanalversuche besitzen damit allgemein einige Vorteile gegenüber maß-

stabsechten Feldexperimenten. Sie sind deutlich preiswerter in Aufbau und Betrieb. Wiederholversuche sind problemlos unter makroskopisch identischen Randbedingungen möglich, was ihre statistische Aussagekraft festigt. Zudem können oft auf einfachem Wege Variationen der Einflussparameter für Sensitivitätsstudien vorgenommen werden. Da aber Skalierungsprobleme nicht vollends ausgeschlossen werden können – nach [54] betrifft das insbesondere die angeführte Ausdehnung der Wirbel zur Ausdehnung des Problems – wird im gleichen Zuge stets empfohlen, dass, sofern möglich, die Ergebnisse durch den Vergleich mit großmaßstäblichen Versuchen abzusichern sind [66]. Umso ratsamer erscheint dies deshalb bei Freisetzungen, die wie im hier betrachteten Fall nicht in die klassische atmosphärische Grenzschicht erfolgen.

### 2.2.3 Dimensionsanalytische Modelle der Schwergasausbreitung

Dimensionsanalytische Modelle nutzen die oben angeführten Erkenntnisse der Dimensionsanalyse. Ohne notwendigerweise Kenntnis von den zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten haben zu müssen, ergeben sich aus der Dimensionsanalyse funktionale Zusammenhänge zwischen den aufgestellten dimensionslosen Produkten und der gesuchten Größe, die mit Hilfe experimenteller Untersuchungen – unabhängig ob dies Feldexperimente oder Versuche im verkleinerten Maßstab sind – quantifiziert werden können. In der Regel verlangt die Methode nur die Kenntnis einer überschaubaren Anzahl von Eingangsgrößen, die durch einfaches Einsetzen ein Ergebnis liefert. Dem stehen enge Anwendungsgrenzen gegenüber, die sich aus den im Rahmen der Dimensionsanalyse zu treffenden Annahmen ergeben [80]. Für die Schwergasausbreitung existieren zwei prominente Modelle dieser Art.

#### 2.2.3.1 VDI-Richtlinie 3783 Blatt 2

Die *VDI-Richtlinie 3783 Blatt 2* [21] zur *Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen schwerer Gase* ist richtlinienkonform anwendbar für die Ausbreitung schwerer Gase in einer atmosphärischen Grenzschichtströmung.

Im Sinne der Richtlinie gelten Gase als schwer, wenn:

1. ihre Dichte am Freisetzungsort größer als  $1,392 \text{ kg/m}^3$  ist
2. (bei kontinuierlichen Freisetzungen) mindestens ein Quellvolumenstrom von  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  kontinuierlich freigesetzt wird.

Als notwendige charakteristische Längen-, Zeit- und Geschwindigkeitsmaße werden:

$$L_{cc} = \left( \dot{V}_Q^2 / g_{eff} \right)^{1/5}, \quad U_{cc} = \left( \dot{V}_Q \cdot g_{eff}^2 \right)^{1/5}, \quad T_{cc} = \left( \dot{V}_Q / g_{eff}^3 \right)^{1/5} \quad (2.6), (2.7), (2.8)$$

definiert. Erkennbar ergeben sich die Maße jeweils aus der Kombination von Quellvolumenstrom  $\dot{V}_Q$  und Dichtedifferenz bzw. der effektiven Fallbeschleunigung nach Gleichung (2.5). Damit wurden ausschließlich Größen, die die Quellbedingungen beschreiben, bei der Definition verwendet. Dieser quellzentrierte Ansatz besitzt den Vorteil, dass die Anwendbarkeit der Richtlinie prinzipiell nicht durch die Orographie der Umgebung beschränkt wird.

In der Richtlinie sind insgesamt 25 Ausbreitungsgebiete aufgeführt, die sich in ihrer Hindernisgestaltung und deren Anordnung unterscheiden. Für alle definierten Gebiete wurden in systematischen Windkanaluntersuchungen von *König* [66] sowie *Marotzke* [72] die Konzentrationsverläufe in Abhängigkeit von der Quellentfernung ermittelt.

Vorteilhaft ist, wie in [66] experimentell belegt, dass der Konzentrationsverlauf unter dimensionsloser Betrachtung im Wesentlichen unabhängig von der Quellgasdichte ist. Die Dichtedifferenz geht damit nur noch mittelbar, nämlich in Form der in Gleichung (2.4) definierten densimetrischen Froudezahl, in das Problem ein. Dies entspricht nach [21] der Boussinesq-Approximation, wonach die Dichteänderung in den Trägheitstermen vernachlässigbar ist.

Die lokale Verdünnung  $\chi$  ist somit letztlich eine Funktion weniger Einflussparameter:

$$\chi = f\left(\frac{x}{L_{cc}}, \frac{y}{L_{cc}}, \frac{z}{L_{cc}}, \frac{U_{ref}}{U_{cc}} = Fr_D, \frac{l_1}{L_{cc}}, \dots, \frac{l_n}{L_{cc}}, \theta\right) \quad (2.9)$$

Für jedes untersuchte Ausbreitungsgebiet ist in der Richtlinie die normierte Konzentration über die mit der charakteristischen Länge  $L_{cc}$  entdimensionierte Quellentfernung für die sogenannte mittlere sowie die ungünstigste Ausbreitungssituation angegeben. Die Werte der mittleren entsprechen dabei dem zeitlichen Mittel der kontinuierlichen Freisetzung; die Mittelwerte addiert mit dem Zweifachen ihrer jeweiligen Standardabweichung bilden der Definition nach die ungünstigste Situation. Die höchsten Konzentrationen werden nach [66] in der Regel bei  $Fr_D = 1$  erreicht.

Eine von der Umgebungstemperatur abweichende Temperatur der Gase wird in der Richtlinie durch eine proportional zum Verhältnis beider Temperaturen angepasste Dichte berücksichtigt.

In der Praxis besteht die Schwierigkeit bei der Anwendung der Richtlinie hauptsächlich darin, die reale Orographie einem zur Auswahl stehenden Ausbreitungsgebiet zuzuordnen. Weitere Ungenauigkeiten ergeben sich durch die Tatsache, dass durch den Bezug des Längenmaßes auf die Quellbedingungen der Konzentrationsverlauf genaugenommen nur Gültigkeit besitzt, sofern die Orographie mit der Freisetzungsrates skaliert. Dies erzwingt ein realitätsfernes „Mitwachsen“ der Hindernisse und der Zwischenräume mit der Freisetzungsrates.

### 2.2.3.2 Modell von Britter-McQuaid

Im *Workbook on the dispersion of dense gases* [32] wird von *Britter & McQuaid* ein weiteres Modell für die atmosphärische Schwergasausbreitung vorgestellt, welches gleichsam auf der Dimensionsanalyse beruht. Für die kontinuierliche Freisetzung sind demnach vorrangig der freigesetzte Volumenstrom  $\dot{V}_0$ , die Dichte der Luft und des Quellgases, eine charakteristische mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $U_c$  und ein charakteristisches Maß der Quelle  $D$  von Bedeutung. Die Oberflächenrauigkeit, die atmosphärische Stabilität, die Turbulenzskala der atmosphärischen Grenzschicht und die Quellgeometrie werden dagegen als weniger wichtig angesehen. Andere physikalische Parameter besitzen nach Einschätzung der Autoren wenig bis keine Relevanz.

Unter verschiedenen Annahmen (u. a. dass  $D$  bei Entfernungen von  $x > 5D$  nicht mehr signifikant ist) ergibt sich die lokale Verdünnung  $\chi$  laut *Britter & McQuaid* sodann aus zwei dimensionslosen Größen:

$$\chi = f\left(\frac{x}{(\dot{V}_0/U_c)^{1/2}}, \left(\frac{g_{eff}^2 \cdot \dot{V}_0}{U_c^5}\right)^{1/5}\right) \quad (2.10)$$

Die zweite Größe wird als Stabilitätsparameter bezeichnet. Das Modell wurde anhand von Feldexperimenten in ebenem, hindernisfreiem Gelände kalibriert. Das Resultat ist ein „universelles“ Nomogramm für  $\chi$  mit dem Stabilitätsparameter auf der Abszisse und einer internen Längenskala auf der Ordinate aufgetragen, aus denen nach Einsetzen der spezifischen Werte einer vorliegenden Problemstellung die der Verdünnung entsprechende Quellentfernung direkt abgelesen werden kann. Temperaturdifferenzen zwischen Quellgas und der Umgebung (bspw. bei Freisetzung von *LNG*) können nach Umrechnung der Konzentration über einen Ausdruck in eine effektive Konzentration berücksichtigt werden. Zusammen mit den empirischen Gleichungen für die Isokonturen der Breite (vgl. Abschnitt 2.2.1.2 sowie [32]) lässt sich hieraus ein dreidimensionales Bild von der Schwergaswolke zeichnen.

Es existieren zudem Approximationen der Kurvenverläufe, die eine Errechnung statt eines tendenziell ungenaueren Ablesens der Werte aus dem Nomogramm gestatten. Einschränkungen bestehen bei der Anwendung auf orographisch durch Hindernisse gegliederte Gebiete aufgrund fehlender Kalibriergrundlage. Zudem streuen die zugrundeliegenden Messergebnisse (bspw. aufgrund der nicht kontrollierbaren Windbedingungen bei den Feldexperimenten) erheblich, was einen hohen Grad an Unsicherheit in den Nomogrammkurven zur Folge hat.

## 2.3 Ausbreitungsrelevante Randbedingungen in Tunnelbauwerken

Ingenieurbauwerke gelten gemäß der *DIN 1076* als Tunnel, wenn sie unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche liegen und in geschlossener Bauweise hergestellt werden oder bei offener Bauweise länger als 80 m sind. Zudem umfassen sie definitionsgemäß teilabgedeckte oberirdische Verkehrsbauten, oberirdische Einhausungen von Straßen, Kreuzungsbauwerke mit anderen Verkehrswegen und Galeriebauwerke ab einer Länge von 80 m [7].

Tunnel variieren in Ausbau und Betrieb in der Praxis stark. Ihre Realisierung orientiert sich im Wesentlichen an den statischen Erfordernissen, die naturgemäß von Standort zu Standort verschieden sind. An dieser Stelle sollen in Vorbereitung der Parameterwahl der experimentellen Untersuchungen die Bedingungen, die nach vorläufiger Einschätzung einen Einfluss auf die Ausbreitung von dichteschweren Stoffbeimengungen nehmen könnten, benannt und beschrieben werden. Eine der Hauptquellen stellen diesbezüglich die im Kontext des Tunnelbaus gültigen gesetzlichen Rahmenbedingungen wie die *Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)* [14] der *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)*, die die europäische Richtlinie *2004/54/EG* zu den *Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz* [81] in nationales Recht umsetzt, und der Teil 5 der *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)* [23], herausgegeben von der *Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)*, dar.

### 2.3.1 Geometrische Restriktionen

Ein einzelnes Tunnelbauwerk umfasst mindestens eine, zumeist aber mehrere nebeneinander verlaufende baulich voneinander getrennte Tunnelröhren. Vom Eingangs- zum Ausgangsportal in einer Röhre besteht entlang des Verkehrsweges durch die umlaufende bauliche Struktur eine allseitige Begrenzung in radialer Richtung. Der Querschnitt variiert über die Tunnellänge meist nur geringfügig (bspw. um Nothaltebuchten zu realisieren). Die Querschnittsform geht größtenteils auf die Bauweise von Tunneln zurück. Bei der geschlossenen, in einem bergmännischen Vortrieb betriebenen Bauweise wird aus statischen Erfordernissen heraus ausnahmslos ein gewölbeförmiger Querschnitt gewählt. Rechteckquerschnitte werden dagegen häufig im Zuge einer offenen Bauweise verwirklicht. Sie sind im Gegensatz zur Gewölbeform durch eine lotrechte seitliche Begrenzung gekennzeichnet (Abbildung 2-4).

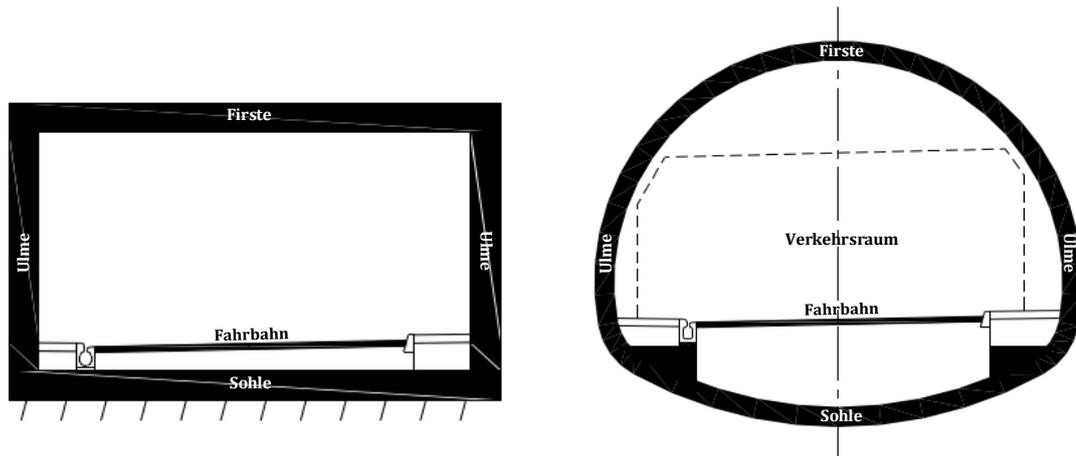


Abbildung 2-4: Rechteckiger (links) sowie gewölbeförmiger (rechts) Querschnitt von Straßentunneln nach [23] mit Bezeichnungen und Begrenzung des Verkehrsraumes (gestrichelt)

In der *ZTV-Ing* und der *RABT* sind die Anforderungen an die Querschnittsgröße festgelegt. So ist innerhalb des Querschnitts ein für den Verkehr vorbehaltener, nahezu unverbauter, lichter Verkehrsraum zu gewährleisten, der sich an einer minimalen lichten Durchfahrthöhe und der Anzahl von Fahrspuren, die auf die zu erwartende Verkehrslast zurückgeht, bemisst. Der verbleibende Raum ist so zu dimensionieren, dass dort sämtliche für die Betriebsführung erforderlichen Einbauten ihren Platz finden. Zur Vereinheitlichung wurde in weiteren Richtlinien eine Auswahl von Regelquerschnitten definiert, die bevorzugt eingehalten werden sollen (siehe [16] und [15]).

Durch die Einhausung des Verkehrsweges ist der Verkehrsraum in Tunnelbauwerken weitgehend von der freien Umgebung, deren Luftbewegungen durch die atmosphärischen Grenzschichtbedingungen bestimmt ist, entkoppelt. Eine Interaktion beider Strömungsfelder kann nur in geringem Maße und ausschließlich über die Tunnelportale erfolgen. Beispielsweise ist bekannt, dass sich bei bestehender atmosphärisch bedingter Druckdifferenz zwischen den Tunnelportalen eine Grundströmung in Richtung des Druckgradienten im Tunnel entwickelt.

Hinsichtlich der Ausbreitung von Stoffbeimengungen ist folglich der zur Verfügung stehende Ausbreitungsraum stark lateral durch die Ulmen (Tunnelwände) sowie vertikal durch die Firste (Tunneldecke) und die Fahrbahn eingeengt. Wie Versuche zur Ausbreitung in der „senkrechten Schlucht“ von *König* [66] sowie *Marotzke* [72] zeigen, ist bei einer seitlichen Begrenzung mit einer geringeren Verdünnung und einer größeren unteren Zünddistanz im Vergleich zur ungehinderten Ausbreitung zu rechnen (vgl. Abschnitt 2.4.2).

### 2.3.2 Durch die Tunnellüftungsanlage erzwungene Strömung

Die *RABT* definiert Anforderungen – unterschieden nach Regelbetrieb und Brandfall – an die Lüftung in Straßentunneln. Auch wenn ehemals der Frischluftbedarf im Regelbetrieb maßgebend

war, ist mit den steten abgasseitigen Verbesserungen von Kraftfahrzeugen heutzutage vielmehr der Brandfall zum Auslegungskriterium geworden [31].

Die natürliche Lüftung, die sich aufgrund der Portaldruckdifferenz im Zusammenspiel mit der von der gerichteten Bewegung der Einzelfahrzeuge verursachten Kolbenwirkung einstellt, erfüllt nicht in allen Betriebssituationen und bei jeder Tunnelkonfiguration die gestellten Anforderungen. Ab einer bestimmten Tunnellänge ist sie flankierend von zusätzlichen in der *RABT* beschriebenen Maßnahmen zu unterstützen. Als Hauptinstrument gilt die Installation einer Zwangslüftung. Mit der mechanischen Längs-, der Halbquer- und der Querlüftung haben sich in der Vergangenheit miteinander konkurrierende Lüftungskonzepte herausgebildet. Die Wahl des geeigneten Konzeptes orientiert sich dabei unter anderem an der Tunnelgesamtlänge. In Anbetracht der Häufigkeitsverteilung entsprechend der Tunnellänge kann für die BRD von einer mechanisch unterstützten Längslüftung als vorherrschendes Lüftungssystem ausgegangen werden [51].

Bei der mechanischen Längslüftung prägen in regelmäßigem Abstand (ca. 100 m) an der Firste angeordnete Strahlventilatoren der Grundströmung einen zusätzlichen Impuls in axiale Richtung auf, dessen Stärke (Schub) je nach Betriebszustand und Erfordernis geregelt wird. Dies ermöglicht eine gezielte und aktive Einflussnahme auf die pro Zeiteinheit durch den Tunnel geförderte Luftmenge. Als Regelgröße der Lüftung wird die über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit in Längsrichtung verwendet. Um im Bedarfsfall ein schnelles Ansprechen der Lüftungsanlage zu gewährleisten, ist in der *RABT* bei Längslüftung eine im Betrieb nicht zu unterschreitende Mindestgeschwindigkeit im Verkehrsraum von 1 m/s definiert worden. Eine maximale Strömungsgeschwindigkeit ist dagegen nicht explizit festgelegt. Eine indirekte Grenze bildet aber der wirtschaftliche Betrieb des Lüftungssystems. In Abhängigkeit vom Gefälle und der Querschnittsform ist im Bereich von 3 m/s vielmehr eine kritische und im Brandfall einzuhaltende Längsgeschwindigkeit in den Richtlinien definiert, die ein Wandern der Brandrauchgase entgegen der Strömungsrichtung aufgrund ihres starken Auftriebsimpulses vermeiden soll [60]. Dieses Stromaufwandern wird als Backlayering bezeichnet (Details siehe Abschnitt 2.4.3).

Im Hinblick auf die notwendige Detailkenntnis der Eigenschaften der erzwungenen Luftströmung im Straßentunnel bieten die Vorgaben der regulatorischen Seite nur unzureichende Anhaltspunkte. Messungen der Strömungsgeschwindigkeit an mehreren Punkten in der Querschnittsebene, aus denen das reale Strömungsprofil extrahiert werden kann, sind wünschenswert, jedoch nur in geringem Maße verfügbar. Strömungen in Straßentunneln sind aktuell nicht in der Tiefe analysiert bzw. systematisiert, wie es bei atmosphärischen Grenzschichtströmungen der Fall ist und wie es für die Vorhersage der Ausbreitung von Stoffbeimengungen als notwendig erachtet wird.

*Schmölzer* untersuchte unter anderem eingehend das Strömungsprofil in mechanisch zwangsbelüfteten Straßentunneln experimentell am Beispiel eines realen Tunnels mit Rechteckform sowie einem mit Gewölbeform jeweils bei vollständiger Hindernisfreiheit. Beide Anlagen erreichen eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/s. Im vollkommen unbeeinflussten Querschnitt, d. h. bei genügender Entfernung von den Ventilatoren, konnte er ein im Sinne der *VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3* gleichförmiges, durch die höchsten Geschwindigkeiten in der geometrischen Mitte sowie verminderte Geschwindigkeiten in den wandnahen Zonen gekennzeichnetes Geschwindigkeitsprofil messen. Starke Abweichungen hiervon treten indes in der Nähe der Strahlventilatoren auf [88].

Der Untersuchung der Strömung in jenen Bereichen haben sich *Colella et al.* gewidmet [35]. Hervorgerufen durch die Impulsübertragung am Strahlaustritt nimmt die Strömungsgeschwindigkeit im leeseitigen Ventilatorbereich vertikal deutlich zu. Erst durch den allmählichen Abbau der Geschwindigkeitsgradienten bildet sich annähernd wieder ein höhenunabhängiges symmetrisches Profil wie bei *Schmölzer* aus, welches mit dem Passieren des nächsten Ventilators indes wiederum zerstört wird. Durch die Strahlventilatoren werden somit regelmäßige lokale Störungen ins Strömungsfeld eingebracht, sodass sich das klassische Strömungsprofil der turbulenten Rohrströmung nicht vollständig ausbilden kann, weshalb die Annahme einer solchen für Tunnelströmungen unterbleiben sollte.

*Schmölzer* nahm zwar Zeitreihen auf, eine Auswertung hinsichtlich der für die hiesige Fragestellung interessanten Turbulenzeigenschaften der Strömung erfolgte hingegen nicht. Eine diesbezügliche Nachfrage beim Autor ergab jedoch, dass die Strömungen um und oberhalb der kritischen Geschwindigkeit sehr geringe Turbulenzintensitäten von circa 1 % aufwiesen. Einen ähnlichen Befund liefern *Król et al.*, die bei Strömungsmessungen im (wiederum hindernisfreien) *Laliki-Tunnel* bei etwa kritischer Geschwindigkeit eine über den Querschnitt gemittelte Turbulenzintensität von 1,4 % bis 3,3 % messen (lokal max. 14,1 %), wie auch hier eine Nachfrage ergab [67]. In beiden Fällen wurde der Einfluss etwaiger Fahrzeughindernisse jedoch nicht berücksichtigt.

### **2.3.3 Hindernisstrukturen durch szenarienbedingte Staubbildung**

Neben den geschilderten anlagenseitigen Gegebenheiten ist szenarienbedingt die große Wahrscheinlichkeit der Staubbildung nach dem Unfallereignis im Tunnel zu berücksichtigen, d. h. die Fahrzeuge kommen in geringem Abstand zueinander zum Stehen, was einer Häufung von bodennahen Hindernissen im Ausbreitungsweg der Gase entspricht. Aufgrund Ihrer Größe sind diese Hindernisstrukturen prinzipiell nicht mehr als Rauigkeit, wie dies teilweise bei den Größenver-

hältnissen der atmosphärischen Ausbreitung möglich ist, parametrisierbar. Stattdessen ist die Situation als eine Ansammlung von zu umströmender, aerodynamisch stumpfer Einzelhindernisse zu betrachten.

Körper, deren Gestalt eine nicht aerodynamisch optimierte Form aufweisen, gelten im Sinne der Aerodynamik vornehmlich als stumpf. Es ist augenfällig, dass bspw. Gebäude dieser Definition entsprechen. Aber auch Fahrzeuge, deren aerodynamische Eigenschaften im Entwicklungsprozess zwar berücksichtigt werden, aber stets ein Kompromiss aus vielfältigen Entwicklungszielen sind, werden hierzu gezählt [90]. Eine scharfe Trennung von stumpfen zu schlanken Körpern existiert nicht. Stumpfe Körper vereint vielmehr, dass sie durch Ablösung bzw. Abriss der Strömung von der Körperkontur geprägt sind. Sie besitzen nicht nur einen höheren Druckwiderstand, sondern in der Wechselwirkung mit der Strömung einen sehr viel weitreichenderen Einfluss auf diese, die zur Ausbildung charakteristischer Strömungsgebiete um den Körper herum, wie einer Stauzone, Scherschichten, dem Totwasser und eines Nachlaufs (Abbildung 2-5) führt.

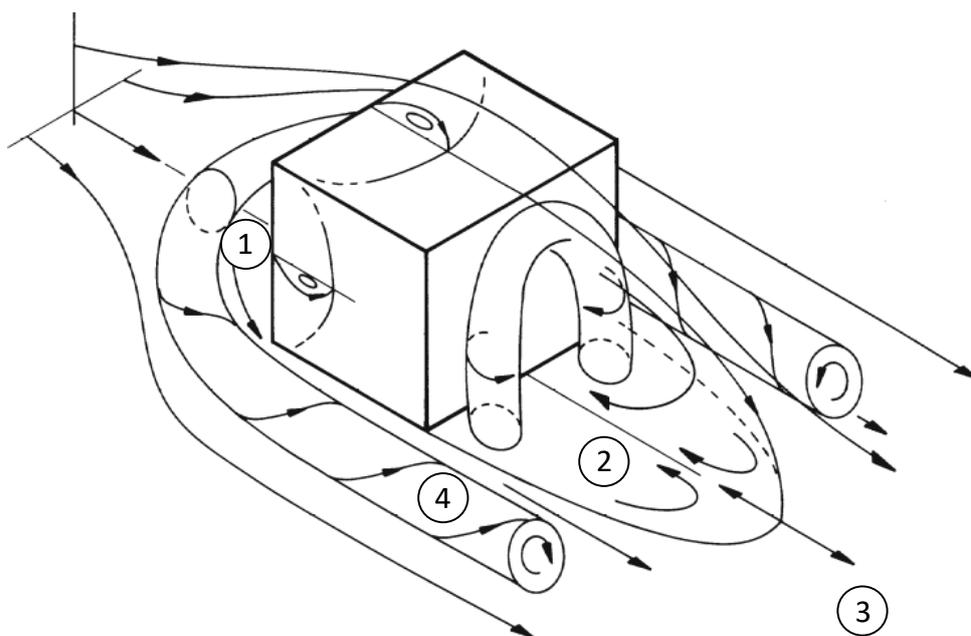


Abbildung 2-5: Schematische Umströmung eines ebenerdigen Würfels als Repräsentant eines stumpfen Körpers mit Kennzeichnung charakteristischer Umströmungsgebiete nach [58]; basierend auf [73]: Stauzone (Pos. 1), Rezirkulationsgebiet oder Totwasser (Pos. 2), Nachlauf (Pos. 3), prägende Strukturen aufgerollter Wirbel in der Scherschicht (Pos. 4)

Unmittelbar vor dem Hindernis bildet sich eine Stauzone (Pos. 1), von wo aus die Fluidteilchen entlang der Körperkontur zu strömen beginnen. An der Stelle, an der der Druckanstieg zu groß wird, löst die Strömung ab. Bedingt durch Scherung bilden sich im Weiteren sich zu immer größeren Strukturen aufrollende Wirbel, die die sich kontinuierlich stromabwärts verbreiternde Scherschicht bilden. Hinter dem Körper isoliert die Scherschicht ein weites Rezirkulationsgebiet

(Pos. 2), das sogenannte Totwasser, von der ungestörten Hauptströmung. Die Strömung im Totwasser ist von hochgradig fluktuierenden, isotropen Bewegungen, also Turbulenz, geprägt, wobei sie sich effektiv nicht mehr in Hauptströmungsrichtung bewegt. Messungen im Totwasser ergeben Turbulenzgrade von bis zu 50 % [58]. Das Totwasser erstreckt sich stromab typischerweise um das Mehrfache der charakteristischen Länge des Körpers. In einiger Entfernung vom Körper geht das Totwasser in den Nachlauf (Pos. 3) über. In diesem bauen sich mit zunehmender Lauflänge die Geschwindigkeitsgradienten quer zur Hauptströmung wieder sukzessive ab und die Strömung nimmt allmählich wieder über den gesamten Querschnitt die Eigenschaften der ungestörten Strömung vor dem Hindernis an. Befindet sich der Körper zudem in Bodennähe so lösen sich aus der Stauzone weitere prägende Wirbel (Pos. 4) ab, die hufeisenförmig das Hindernis umlaufen [42].

Die hier geschilderte Strömungstopologie ist nicht als beständig und stationär zu verstehen. Im Zusammenspiel der Kräfte und der Körperkontur können äußerst komplexe, periodisch sowie nicht-periodisch auftretende Wirbelstrukturen entstehen, wie die umfangreichen Untersuchungen zu den prägenden Wirbelstrukturen z. B. in *Hosker* [57] offenbaren. Schon eine leichte Änderung der Ausrichtung eines Körpers in der Strömung kann maßgeblichen Einfluss auf die Struktur von Scherschicht, Totwasser und Nachlauf besitzen. Stumpfe Körper sind darum stets als Einheit zu betrachten [58].

Bei Anwesenheit mehrerer Hindernisse treten die geschilderten charakteristischen Strömungsgebiete der Einzelhindernisse zudem in starke Wechselwirkung miteinander. Dies führt im Ergebnis zu scheinbar stochastischen Erscheinungen, die sich einer Strukturierung entziehen, so dass nur noch eine makroskopisch statistische Beschreibung sinnhaft ist. CFD-Simulationen zeigen, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der durch Strahlventilatoren erzeugten Strömung im Tunnel bei Staubbedingungen deutlich absinkt sowie zu einem ungleichmäßigen bodennahen Strömungsfeld führt mit zum Teil erheblich reduzierter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit in den verbliebenen Fahrzeugzwischenräumen [44]. Da Hindernisse wie geschildert effektive Turbulenzgeneratoren darstellen, ist überdies anzunehmen, dass die Turbulenzintensität der Tunnelströmung in der realen Stausituation deutlich oberhalb der im vorderen Abschnitt genannten Werte liegt. Messungen, die diesen Aspekt beleuchten, wurden bei der Recherche nicht gefunden. Eine Systematisierung der Hindernisanordnungen kann im gegebenen Fall infolge des unbekannteren tatsächlichen Unfallhergangs ebenfalls nur schwerlich vorgenommen werden. Bei der Hindernisform scheint es zumindest zweckmäßig, einerseits in die Klasse der Pkw und andererseits in die der Lkw und Busse zu unterscheiden, wobei in letzterer die Fahrzeuge naturgemäß die größeren Ausmaße besitzen. Der Schwerlastanteil in Straßentunneln variiert dabei von Tunnel zu

Tunnel stark. Eine Auswertung der Daten des 14. Tunnel-Tests des ADAC von 2015 hinsichtlich dieses Kriteriums ergab einen durchschnittlichen Lkw-Anteil von 15 % [1].

#### **2.3.4 Freisetzungsbedingungen**

Diese Arbeit beschränkt sich ausschließlich auf kontinuierliche Freisetzungen. Tritt brennbares Gas aus, so hängt die die Gefahrensituation bestimmende Quellrate neben den Fluideigenschaften und den Speicherbedingungen von der Lage und der Form der Austrittsöffnung ab [80].

Lage und Gestalt der Öffnung sind situativ und darum bei der theoretischen Vorbetrachtung per se unbekannt. Triebkraft der Freisetzung ist der im Behälter herrschende Druck. Je nach Lage der Leckage und dem thermodynamischen Zustand des Stoffes im Behälter erfolgt die Freisetzung gasförmig, flüssig oder in Form eines Zweiphasengemisches aus beidem. Die größte Quellrate ergibt sich bei ausschließlich flüssigem Austritt, welcher auf relativ einfache Weise mit der Bernoulli-Gleichung abgeschätzt werden kann. Durch Bedingungen, die zu einem Austritt als Zweiphasengemisch bzw. Phasenübergängen am Ort der Austrittsöffnung führen, kann sich die Quellrate verringern. Um die resultierende Quellrate bei diesen weitaus komplexeren Vorgängen vorhersagen zu können, wurden in der Vergangenheit spezielle Modelle entwickelt (siehe dazu [80]).

Um die Größe der explosionsfähigen Atmosphäre schlussendlich praktisch bemessen zu können, ist eine das Szenario repräsentierende Leckgröße zu wählen. Im Zuge von Worst-Case-Betrachtungen, wie sie zur Beschränkung von Gefahrguttransporten durch Tunnel durchgeführt werden müssen, werden Leckgrößen von 50 mm im Durchmesser und damit Propanquellraten von über 30 kg/s als Standardszenario für Gefahrgüter der Klasse 2 angenommen [28]. Häufiger werden dagegen deutlich kleinere Austrittsöffnungen bis etwa zu einem Durchmesser von 10 mm auftreten, wie sie z. B. beim Abriss von Rohrleitungen üblicher Größe erwartet werden können.

Gleichzeitig zeigt sich, dass die im Vorderen diskutierte, absolut mitgeführte Gasmenge nicht von Bedeutung bei der Bestimmung der Quellrate ist (vgl. 2.1.1). Zweifellos können Freisetzungen mit großen Raten nur bei den großen Transportmengen von Gefahrguttransporten zu kontinuierlichen heranwachsen, während sie ansonsten spontane blieben. Letztlich bestimmt die Quellmenge aber nur die Freisetzungsdauer, die nach dem Erreichen eines quasistationären Ausbreitungszustandes für die Größe der explosionsfähigen Atmosphäre unerheblich ist.

#### **2.3.5 Weitere Bedingungen**

Die Fahrbahn im Tunnel kann unabhängig von anderen geometrischen Restriktionen zusätzlich eine Längs- sowie Querneigung aufweisen. Eine Längsneigung von über 5 % soll in Tunneln ver-

mieden werden [14]. Querneigungen können dagegen wie auf der freien Strecke maximal 8 % betragen [16]. Es ist bekannt, dass eine nicht waagerechte Oberfläche die Ausbreitung schwerer Gase in Richtung des Gefälles fördert [50]. Inwiefern die Konzentrationen in der Wolke dadurch beeinflusst werden, gilt zu untersuchen.

Der Vollständigkeit halber sollen hier abschließend die Umgebungsbedingungen im Tunnel Erwähnung finden. Höhenabhängige Temperaturverläufe, die wie in der Atmosphäre zu thermischen Schichtungsphänomenen führen, treten im vertikal begrenzten Tunnelinneren nicht auf. Die Umgebungstemperatur liegt durchschnittlich einige Kelvin über dem Jahresmittel [10]. In Tunnelbauwerken herrscht üblicherweise eine relativ hohe relative Luftfeuchtigkeit von 60–85 %rF [49]. Die Betonstützstrukturen an Wänden und Boden bilden große Wärmekapazitäten. Alle drei genannten Effekte könnten insbesondere eine größere Rolle bei dem Ausbreitungsverhalten der Gase spielen, die wie LNG und LH<sub>2</sub> ausschließlich im tiefkalten Zustand ein Schwergasverhalten zeigen.

## 2.4 Ausgewählte Untersuchungen zur Stoffausbreitung

Während für den allgemeinen Fall der Schwergasausbreitung in einer atmosphärischen Grenzschicht eine Vielzahl von veröffentlichten Daten experimenteller als auch numerischer Art vorliegen, existieren im speziellen Fall nur eine Handvoll Quellen, die sich entweder explizit mit dem Szenario beschäftigen oder auf dieses im ersten Ansatz adaptierbar erscheinen. Jene sollen an dieser Stelle hinsichtlich ihrer Erkenntnisse zum Ausbreitungsverhalten schwerer Gase im Tunnel diskutiert werden.

### 2.4.1 Tunnelspezifische Untersuchungen schwerer Gase

Im Rahmen einer allgemeinen QRA für Tunnel haben sich sowohl *Weerheijm & van den Berg* [101] als auch *Considine et al.* [36, 37] mit dem Szenario der Ausbreitung brennbarer, schwerer Gase innerhalb der Tunnelumgebung – in beiden Fällen am Beispiel von LPG – befasst. Sie legen dabei das Leckschlagen eines LPG-transportierenden Gefahrguttanks zu Grunde, was im Falle kontinuierlicher Freisetzung zur Annahme von sehr großen Freisetzungsraten führte.

*Weerheijm & van den Berg* gehen nach Freisetzung von einer uniformen Verteilung der brennbaren Stoffe über den Tunnelquerschnitt aus. Es ergibt sich demnach nur noch eine eindimensionale Ausbreitung entlang des Tunnels. Gemäß ihrer Ansicht wird das Gas durch die Ventilation stromab mitgetragen und mischt sich dabei sogleich vollständig homogen in die Luftströmung ein, so dass sich in der Gemischwolke unabhängig von Ort und Zeit eine universelle Konzentration  $c_T$

der Stoffbeimengung im Tunnel einstellt, die sich nach Gleichung (2.11) aus dem Quellvolumenstrom  $\dot{V}_Q$ , der Propangasdichte  $\rho_{C_3H_8}$ , der von den Ventilatoren erzeugten Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  $u_S$  und dem Tunnelquerschnitt  $A_T$  berechnet.

$$c_T = \frac{\dot{V}_Q}{\rho_{C_3H_8} \cdot u_S \cdot A_T} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Unter Berücksichtigung der Explosionsgrenzen von Propan können demnach nur unter gewissen Konstellationen von Quell- und Strömungsbedingungen explosionsfähige Atmosphären auftreten. Die Autoren gelangen im Weiteren zu dem im ersten Moment unlogisch anmutenden Schluss, dass bei größeren Quellraten kleinere explosionsfähige Atmosphären erwartet werden können, als dies bei kleinen der Fall ist. Denn bei zunehmenden Quellraten nähmen die Bereiche im Ausbreitungsgebiet, in denen die Konzentration oberhalb der OEG liegt, zu, womit nur die Randgebiete, in denen die Konzentrationen zwischen OEG und UEG liegen, zur explosionsfähigen Atmosphäre gezählt werden dürften, so die Autoren. Dementsprechend geht von jenen mit großen Quellraten auch eine geringere Gefahr aus. Ein Anheben der Förderleistung der Ventilatoren führe dann großräumig zu einem Unterschreiten der OEG im vormals zu „fetten“ Bereich und damit zu einer größeren explosionsfähigen Atmosphäre. Allgemein sei es zudem möglich, dass die Explosion in einen detonativen Verlauf übergeht. Einschränkend wird in der Schlussbemerkung aber explizit darauf hingewiesen, dass bevor weitreichende Schlussfolgerungen gezogen werden, die Annahmen experimentell zu prüfen sind [101]. Der größte Kritikpunkt liegt hierbei zweifelsohne in der vollständigen Vernachlässigung der Erkenntnisse zum auftriebsbedingten Misch- und Verdünnungsverhalten schwerer Gase, was den eingangs gewählten Ansatz der uniformen Konzentrationsverteilung als unzulässig stark vereinfachend und fragwürdig erscheinen lässt.

*Considine et al.* berücksichtigen dagegen einen potentiellen Schwergaseneffekt des freigesetzten Gases, in dem von einer Schichtung der Gase und einer bodennahen Ausbreitung im Tunnel ausgegangen wird. Die theoretischen Überlegungen führen darauf, dass nach kurzer Dauer die Gaswolke die lateral den Boden begrenzenden Tunnelwände erreichen, womit nur noch ein zweidimensionales Problem vorliegt und eine Einmischung von Luft in die Wolke lediglich über die Deckfläche erfolgen kann. Auf Basis von Experimenten von *Ellison & Turner* [45] zum Einmischverhalten von Luft in schwere Fluide sowie in Analogie zur Ausbreitung von Leichtgasfronten an Decken von Minenschächten, untersucht von *Bakke & Leach* [27], wird ein einfaches Modell zum Ausbreitungsverhalten im Tunnel abgeleitet, welches eine grobe Vorhersage der Konzentration entlang des Tunnels in Abhängigkeit der Tunnelbreite, der Luftgeschwindigkeit und der Quellstärke gestattet.

Wertvolle Ergebnisse experimenteller Art wurden dagegen von *Gröbelbauer* [50] veröffentlicht. Er untersuchte die Ausbreitung anhand der Wolkenfront von instantan freigesetzten schweren Gasen in allseits verschlossenen Kanälen im Modellmaßstab. Durch eine vertikale Abtrennung (Schott) wurden Gase unterschiedlicher Dichte voneinander getrennt. Nach Entfernen des Schotts ließen sich zwei in entgegengesetzter Richtung an Decke und Boden entlangschreitende Fronten beobachten. Trotz objektiv gleicher Kräfteverhältnisse wurde aus der Visualisierung der Fronten eine Asymmetrie der beiden sich ausbreitenden Fronten festgestellt. Ein vollständig analoges Verhalten zwischen der Ausbreitung von Leicht- und Schwergasen ist, anders als von *Considine* vermutet, folglich nicht gegeben. Zudem weist *Gröbelbauer* an einer teiltgeneigten, lateral nichtbegrenzten Oberfläche ein von heißen Gasen bekanntes Backlayering (vgl. 2.6.3) auch für schwere Gase nach. *Gröbelbauer* beschäftigte sich darüber hinaus, als einer der wenigen im Modellkanal, mit der Ausbreitung von nicht-isothermen Schwergaswolken und konnte für Wolken kälter als die Umgebung eine erhöhte Einmischung von Luft feststellen, was er auf eine durch die Konvektion bedingte instabile Dichteschichtung innerhalb der Wolke zurückführt.

Mit den Konsequenzen, die sowohl inner- als auch außerhalb der Tunnelgeometrie bei der Ausbreitung toxischer, schwerer Gase in Straßentunneln zu erwarten sind, beschäftigten sich *Truchot et al.* [97]. In ihren Experimenten in einem längsdurchströmten, tunnelähnlichen Versuchsstand im Maßstab 1: 3 setzten sie nichtgiftiges Argon kontinuierlich, jedoch impulsbehaftet unter anderem in variierender Ausrichtung der Leckageöffnung frei. Bei Ausrichtung gen Boden stellte sich in einer Entfernung von 15 m stromab der Quelle eine vertikale Schichtung entsprechend der Gasdichte ein, sodass bodennah die höchste Konzentration an Argon auftrat. Die nachgebildete Konstellation entspräche dabei in der Realität einer Freisetzung mit der Rate von 0,43 kg/s unter einer Längslüftungsgeschwindigkeit von 0,7 m/s im zweispurigen Tunnel.

Am bis dato umfassendsten wurde sich mit der Problematik schwerer Gase in Tunneln unter Zuhilfenahme numerischer Methoden – am Beispiel von Chlorgas – auseinandergesetzt. Im Auftrag der *Health and Safety Executive (HSE)* [53] wurden im Jahre 2001 mit den Möglichkeiten der zu dieser Zeit ersten kommerziell verfügbaren CFD-Programme zwei voneinander unabhängige numerische Tunnelumgebungen abstrahiert, in denen der ausbreitungsspezifische Einfluss der Quellbedingungen, Lüftungsarten, Fahrbahnneigungen und Staubbedingungen abgebildet werden konnte. Aus den 3D- sowie 2D-Simulationen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen und Schlussfolgerungen gezogen: Auch in der Simulation zeichnet sich ein Schwergasverhalten ab. Fahrzeughindernisse führen dabei zu einem verstärkten Mischen und in Folge zur Homogenisierung der Konzentrationen über die Tunnelbreite. Große Freisetzungsraten besitzen eine Rückwirkung auf die Tunnelströmung. Übliche Absaugöffnungen im Deckenbereich wurden als ineffizient

bezüglich der Absaugung der Schwergase identifiziert. Weitere Einzelheiten sollen hier ausgespart bleiben und sind dem Report zu entnehmen. Die Ergebnisse stützen sich auf numerische Modelle, die nach heutigen Maßstäben eine zu grobe Diskretisierung aufweisen.

Neuere CFD-Untersuchungen mit einer feineren Netzauflösung von *Muzamal* [77] und am Beispiel von LPG lassen ungleichmäßige Konzentrationsverteilungen aufgrund außermittiger Quellen und individueller Umströmungsverhältnisse der Fahrzeuge im Tunnel erkennen.

## 2.4.2 Schwergasexperimente im Zuge der VDI 3783 Blatt 2

Dem Objekt „Straßentunnel“ kommt im Rahmen der VDI-Richtlinie das Ausbreitungsgebiet III „senkrechte Schlucht“ wohl am nächsten. Hierbei wird von zwei windparallelen Wänden ausgegangen, zwischen welchen die Quelle positioniert ist. Dabei gelten die Wände als „unendlich“ hoch, d. h. die Stoffbeimengung gelangt bei der Ausbreitung nicht über die Wände. In dieser Konfiguration wurden im Vergleich die mit Abstand weitesten Zündabstände unter allen Gebieten festgestellt (vgl. Abbildung 2-6). Die „Senkrechte Schlucht“ stellt damit das kritischste Ausbreitungsgebiet dar (vgl. [65, 72]). Zudem wiesen Messungen über die Schluchtbreite nur kleine Konzentrationsgradienten auf, was auf eine verstärkte Durchmischung um die Wände zurückgeführt wird (vgl. [66]). Für die im Falle der kontinuierlichen Freisetzung im Vergleich zu *Marotzke* und der VDI bei *König* signifikant erhöhten Konzentrationen, die sogar über der der ungünstigsten Situation der VDI liegen (vgl. eb. Abbildung 2-6), wird in der Literatur keine Begründung geliefert. Vermutet werden kann ein Einfluss der Schluchtbreite. So stellte *Donat* in späteren Untersuchungen eine Abhängigkeit des longitudinalen Konzentrationsprofils von der Breite der Schlucht fest [40].

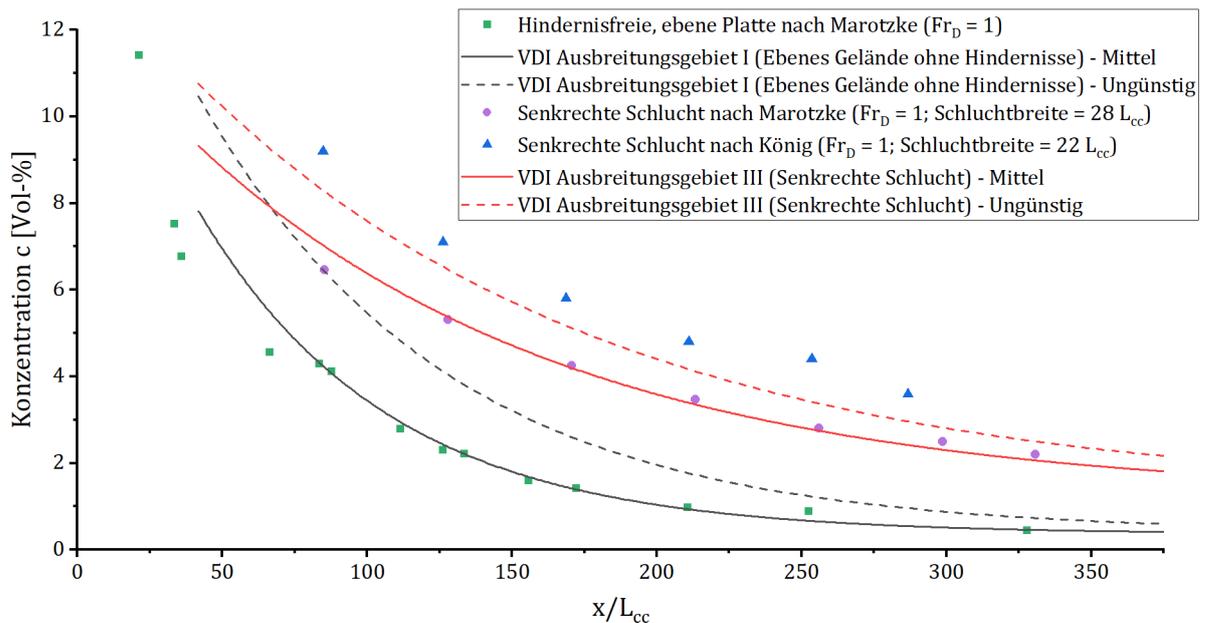


Abbildung 2-6: Vergleich der longitudinalen Konzentrationsverläufe von Marotzke, von König sowie der mittleren und ungünstigsten Situation der VDI 3783 Blatt 2 für das Ausbreitungsgebiet der „Senkrechten Schlucht“ sowie das ebene, hindernisfreie Ausbreitungsgebiet

Überdies existieren widersprüchliche Angaben in der Literatur zur Breite (in Form des Vielfachen der charakteristischen Länge), welche die von *König* modellierte Schlucht bei der kontinuierlichen Freisetzung aufwies. *König* nennt explizit keinen Wert. *Marotzke* sowie *Donat* geben einen Wert von  $22 L_{cc}$  an [40, 72]. *König* selbst nennt in einer späteren Veröffentlichung einen Wert von  $14 L_{cc}$ , der auch in der *VDI-Richtlinie* abgedruckt ist [21, 65]. Wobei in der dem Autor vorliegenden Version dieser wiederum handschriftlich durch  $28 L_{cc}$  ersetzt wurde. Beide letztgenannten Quellen präsentieren indes dann aber die Konzentrationsverläufe von *Marotzke* (dessen Schluchtbreite tatsächlich einen Wert von  $28 L_{cc}$  aufwies). Eigene Nachrechnungen führen auf eine eingestellte Breite bei *König* von  $22 L_{cc}$ . Ungewissheit besteht daneben also auch darüber, welche Daten im Weiteren tatsächlich in die *VDI 3783 Blatt 2* übernommen wurden. In der Richtlinie wird zwar *König* als Referenz genannt, doch sind nicht nur die abgebildeten Verläufe identisch mit *Marotzke* sondern ebenso die Datenpunkte im der Richtlinie beigefügten Berechnungsprogramm zur Ermittlung der UZD [71].

Obwohl, da explizit auf atmosphärische Ausbreitungen beschränkt, die *VDI-Richtlinie* nicht für die Ausbreitung in Tunneln anwendbar ist, so scheint es beim aktuellen Kenntnisstand zunächst gerechtfertigt, grundsätzlich von einer ähnlichen Tendenz der Konzentrationszunahme auszugehen, da in beiden Fällen das Ausbreitungsgebiet lateral verengt ist. Abweichungen von der Ausbreitung im Tunnel und damit Einschränkungen in der Übertragbarkeit können sich durch die fehlende Nachbildung der Tunneldecke, dem im Windkanal verwendeten atmosphärischen Grenzschichtprofil, dem Fehlen von Hindernissen sowie in einem abweichenden Verhältnis von Freisetzungsrate zur durch die Wände gegebenen Schluchtbreite ergeben.

### **2.4.3 Untersuchungen zur Brandrauchausbreitung im Tunnel**

Im wissenschaftlichen Diskurs wird bei der Ausbreitung von gasförmigen Stoffen explizit in Tunneln den leichten (heißen) Gasen bis dato wesentlich mehr Beachtung geschenkt als den schweren. Es kann sich deshalb als nützlich erweisen, im Sinne eines Überblicks über die Eigenheiten, die der Tunnel potentiell für die Ausbreitung von schweren Gasen bietet, sich die Erkenntnisse, die insbesondere zur Ausbreitung von Brandrauchgasen bestehen, einmal zu vergegenwärtigen.

In dieser Hinsicht ist insbesondere das Phänomen des Backlayering zu nennen. Das so benannte Stromaufwandern von Brandrauchgasen geht dabei auf folgende Gegebenheiten zurück: Heiße Rauchgase besitzen eine wesentlich geringere Dichte als Luft, die ihnen einen Auftrieb verleiht. Sie steigen auf und erreichen die Tunneldecke. Durch die vertikale Begrenzung können sie sich im Anschluss nur noch entlang dieser ausbreiten. Ist die Trägheitskraft der Luftströmung gegenüber

der Schwerkraft der Gase zu klein, breiten sie sich ebenfalls entgegen der vorherrschenden Strömungsrichtung aus. Erst wenn durch größere Luftgeschwindigkeiten die Trägheitskraft überwiegt ( $Fr > 1$ ), können Rückströmungen vermieden werden [60, 95].

Hieraus erwuchs historisch das Konzept der kritischen Längsgeschwindigkeit im Tunnel, die im Brandfall einzuhalten ist (siehe Abschnitt 2.3.2). Weiterhin ist bekannt, dass die Neigung der Tunneldecke eine gewichtige Rolle beim Backlayering einnimmt [64]. Je nach Richtung der Neigung kann sie förderlich oder hinderlich sein. Außerdem wurde ein Drosseleffekt der Brandherde auf die Lüftung nachgewiesen [98]. Dagegen erhöhen stehende Fahrzeuge durch die Verkleinerung des Strömungsquerschnitts die Lüftungsgeschwindigkeit an der Decke [68].

Was die Darstellung als relevant erachten lässt, sind die theoretisch spiegelbildlichen Verhältnisse von Leichtgasen an der Tunneldecke zum Schwergas auf der Fahrbahn, wenngleich wie erläutert *Gröbelbauer* im Detail experimentell bereits Unterschiede beim Vergleich der Ausbreitung beider Konstellationen für den Kanal festgestellt hat (siehe Abschnitt 2.4.1). *Truchot et al.* berichten in [97] ebenfalls knapp davon, dass sich eine der Strömung entgegenwirkende Gasschicht – von ihnen als „Low-Backlayering“ bezeichnet – in ihren Experimenten anteilig beobachten ließ. Aus sicherheitstechnischer Sicht ist es daher wichtig zu prüfen, ob sich dieses Verhalten zweifelsfrei nachweisen lässt. Und wenn ja, gilt es weitergehend zu klären, inwiefern die Tunnelneigung hierbei einen Einfluss nimmt und ob die Lüftung eventuell ein genauso effektives Mittel der Eindämmung des Stromaufwanderns sein kann.

#### **2.4.4 Untersuchungen zum Hinderniseinfluss**

In Ermangelung anderweitiger Untersuchungsgebiete wird sich an dieser Stelle auf die Erkenntnisse des Hinderniseinflusses in atmosphärischen Grenzschichtströmungen bezogen. Der Begriff des Hindernisses umfasst im Kontext der Schwergasausbreitung dabei jegliche Geometrien, die aufgrund ihrer Größe nicht mehr als Rauigkeit parametrisierbar sind. Da abhängig von der Hindernisform unterschiedliche Phänomene beobachtet werden – so ist die überwiegend verdünnende Wirkung nach *Havens & Spicer* [55] keineswegs bei jeder Form gegeben – soll sich bei der Schilderung auf würfelförmige Hindernisse beschränkt werden, da die Fahrzeughindernisse in der vorliegenden Arbeit auch durch jene abgebildet werden.

*Hartwig* [54] weist auf zwei Effekte hin, die mit der Anwesenheit von Hindernissen einhergehen und der zwangsweisen Umströmung jener von dem strömenden Fluid geschuldet sind. Auf Seiten des Schwergases kann dies unmittelbar zur Turbulenzproduktion innerhalb der Wolke führen. Auf gleiche Weise wird auch die Außenströmung turbulenter, die ihrerseits die Schwergasausbreitung beeinflusst.

Nach Auswertung der Ausbreitungsversuche mit Anwesenheit eines Gebäudekubus der Kantenlänge von 9 m, die Bestandteil der Thorney-Island-Kampagne waren, stellten *Schnatz & Hartwig* [89] fest, dass die Positionierung des Kubus stromauf der Quelle ein Stromaufwandern der Schwergase ins Totwasser des Hindernisses bewirkt, die stromabseitige Platzierung dagegen in einer Stauung der Gase vor dem Hindernis resultiert. In beiden Fällen wurde anhand der Gaskonzentration ein vertikales Hochwandern der Gase entlang der Körperkante beobachtet. Global betrachtet belegen *Wörsdörfer & Hartwig*, dass die Wolke bei Hinderniseinfluss ein anderes dynamisches Verhalten besitzt, welches eine Änderung des charakteristischen longitudinalen Konzentrationsverlaufs nach sich zieht. Hindernisse wirken, sofern sie solitär stehen, demnach generell als Turbulenzgeneratoren. Die Autoren gelangten zur Einschätzung, dass hierfür die durch Turbulenzbildung vermehrte vertikale Bewegung im leeseitigen Bereich verantwortlich ist [104]. Handelt es sich nunmehr um einen Pulk aus Einzelhindernissen so macht wiederum *Hartwig* darauf aufmerksam, dass ein Kanalisierungseffekt auftreten kann [54]. Dies führte bei *Marotzke* zu der Überlegung, dass es im Sinne einer minimalen UZD eine durch den Abstand der Hindernisse zueinander bestimmte günstigste Bebauungsdichte geben muss [72]. Anhand des Ausbreitungsgebietes der „lockeren Bebauung I“ konnte er zwar experimentell zeigen, dass umso dichter die Hindernisse beieinanderstehen, desto schneller fallen die Konzentrationen mit Quellentfernung ab, wobei ebenso eine Zunahme der Hindernishöhe die Konzentration sinken lässt. Zu dem Hindernisabstand, an dem die Zunahme der Konzentration wieder einsetzt, gelangte er auf experimentellem Wege aber nicht.

CFD bieten heutzutage die Möglichkeit, tiefer in die Ausbreitung zu blicken. So lässt sich beispielsweise an jeder Stelle in den Zwischenräumen die zeitabhängige Stoffkonzentration bestimmen. Sowohl *Meroney* [74] als auch *Scargiali et al.* [85] sowie *Liu et al.* [69] untersuchten auf diesem Wege die Ausbreitung schwerer Gase in einer strukturierten Anordnung von Kuben. *Meroney* bestätigte so, dass Hindernisse für eine vermehrte vertikale Bewegung sorgen. Er verweist aber auch darauf, dass im Lee der Einzelhindernisse hohe Konzentrationen verbleiben. *Scargiali et al.* bestätigen, dass Hindernisse zwar allgemein die Bodenkonzentration reduzieren, gleichzeitig überdeckt die Wolke aber insgesamt eine größere Fläche. In [69] ist erkennbar, dass sich bei genügend hohen Hindernissen aufgrund der Blockung der Hauptstrom aufteilt, was zu einer starken lateralen Verbreiterung der Wolke führt.

Die Ausführungen machen deutlich, dass es a priori nicht abschätzbar ist, welcher der Effekte unter den Bedingungen des Staus im Tunnel dominiert und wie damit die Ausbreitung im Endeffekt beeinflusst wird. Einerseits verkleinert die Anwesenheit weiterer Hindernisse das schon durch die Tunnelwände begrenzte Ausbreitungsgebiet weiter. Andererseits sollte die vermehrte Turbulenzproduktion bei der Hindernisumströmung für eine bessere Verdünnung sorgen.

### 3 Untersuchungen im Modellmaßstab

Im Rahmen dieser Arbeit wurde unter anderem in einem kleinmaßstäblichen Modellversuchsstand die Ausbreitung kontinuierlicher Freisetzungen schwerer Gase in tunnelähnlichen Geometrien unter Variation möglicher Einflussparameter nachgebildet. Mit Hilfe einer fallbezogenen Dimensionsanalyse werden in diesem Kapitel zunächst die wesentlichsten Einflussparameter, die zuvorderst im Untersuchungsrahmen zu berücksichtigen sind, identifiziert. Daran schließt sich die Beschreibung der verwendeten Versuchseinrichtung an, auf welche eine Diskussion der Anwendungsgrenzen und der Versuchsstandeignung folgt, für die unter anderem die Eigenschaften des Strömungsfeldes im realisierten Modellgebiet untersucht wurden. Im Anschluss werden ausführlich die eigentlichen ausbreitungsbezogenen Untersuchungen dargelegt.

#### 3.1 Tunnelbezogene Dimensionsanalyse

Basis der kleinmaßstäblichen Versuche bildet die anwendungsfallbezogene Dimensionsanalyse. Im Folgenden wird die in der VDI 3873 Blatt 2 beschriebene Vorgehensweise adaptiert und auf die Problemstellung übertragen. In Abbildung 3-1 sind die das System charakterisierenden Parameter grafisch wiedergeben. Das tunnelsegmentbezogene Koordinatensystem mit den Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  wurde dabei in den Flächenschwerpunkt der Fahrbahnoberfläche gelegt.

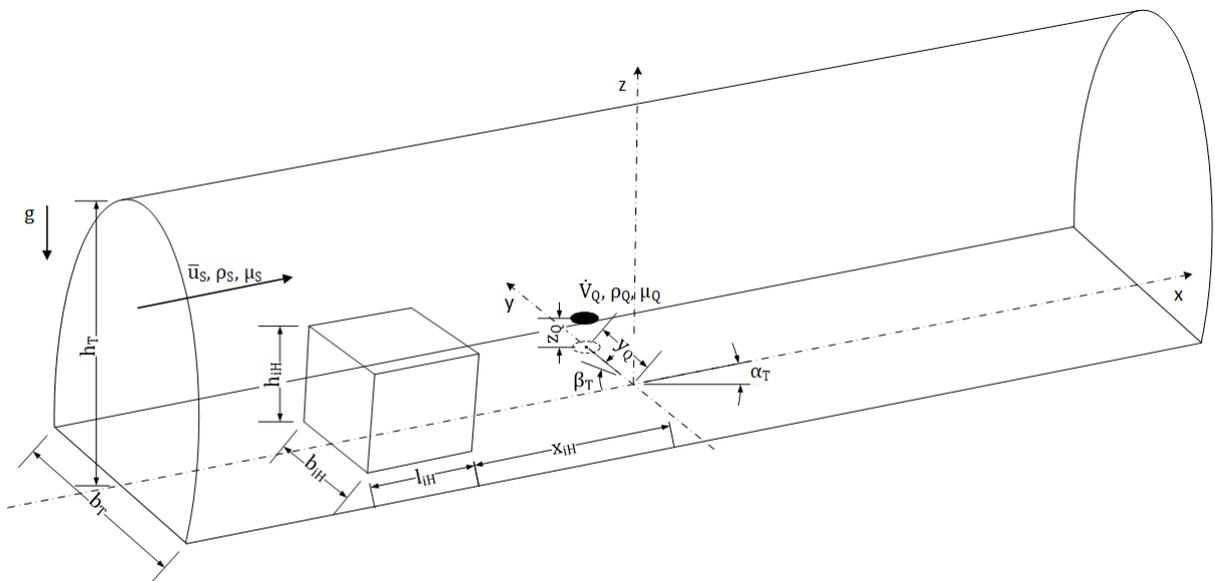


Abbildung 3-1: Problembeschreibung der kontinuierlichen Schwergasausbreitung im Tunnel

Grundsätzlich wirkt im System die Erdbeschleunigung  $g$ . Idealisiert wird der Tunnel bei Annahme einer unendlich axialen Ausdehnung geometrisch durch die Tunnelbreite  $b_T$  sowie die Tunnelhöhe  $h_T$  beschrieben, die gleichzeitig die Restriktionen für das Ausbreitungsgebiet darstellen. Die Fahrbahnoberfläche kann dabei eine Längsneigung  $\alpha_T$  wie eine Querneigung  $\beta_T$  aufweisen. Im

Tunnel herrscht zudem eine Längsströmung, die charakterisiert wird durch Dichte  $\rho_S$  und dynamische Viskosität  $\mu_S$  sowie ihre mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}_S$ . Der aus der Quelle kontinuierlich freigesetzte Stoff soll sich aufgrund der unbekanntenen realen Quellgeometrie an der Stärke des austretenden Quellvolumenstroms  $\dot{V}_Q$  sowie an der Anfangsdichte  $\rho_Q$  (Produkt beider bildet den Quellmassenstrom  $\dot{m}_Q$ ) und der dynamischen Viskosität  $\mu_Q$  des Stoffes bemessen. Der Quellort kann prinzipiell außer auf der Mittelachse ebenso seitlich dazu um das Maß  $y_Q$  versetzt sein sowie unabhängig davon um das Maß  $z_Q$  von der Fahrbohnoberfläche erhöht liegen. Die Betrachtung einer Verschiebung auf der Tunnellängsachse erübrigt sich aufgrund der Annahme des Ausschnitts aus einem idealisiert über seine Länge gleichbleibenden Tunnel. Eventuell vorhandene quaderförmige Hindernisse im Ausbreitungsgebiet sollen durch Länge  $l_{iH}$ , Breite  $b_{iH}$ , Höhe  $h_{iH}$  (im Falle von Würfelhindernissen reduzieren sich diese auf die Kantenlänge  $a_{iH}$ ) sowie dem longitudinalen Abstand zur Quelle  $x_{iH}$  charakterisiert werden mit dem Laufindex  $i = 0 \dots n$ , wobei  $n$  die Anzahl der Hindernisse angibt.

Eine Berücksichtigung weiterer insbesondere geometrischer Parameter – also Parameter, die es zulassen, sich der realen Fahrzeugkontur anzunähern wie bspw. Radien von Verrundungen oder Winkel nichtorthogonaler Flächen – ist problemlos möglich, wird aber im Hinblick auf die angestrebte möglichst allgemeine Beschreibung der Ausbreitung und den sich ergebenden sukzessive ansteigenden Untersuchungsumfang unterlassen.

Unter Annahme einer Quellkonzentration  $c_Q$  von 100 % ergibt sich nach  $\chi = c/c_Q$  die lokale Konzentration  $c$  im Tunnel sodann als Funktion der genannten Größen:

$$c = f_1(x, y, z, g, \rho_Q, \mu_Q, \dot{V}_Q, y_Q, z_Q, \rho_S, \mu_S, \bar{u}_S, h_T, b_T, \alpha_T, \beta_T, l_{iH}, b_{iH}, h_{iH}, x_{iH}) \quad (3.1)$$

Mit geeigneten charakteristischen Maßen der Länge, der Geschwindigkeit und der Zeit kann nach dem  $\pi$ -Theorem von *Buckingham* die Anzahl der Variablen nunmehr um drei reduziert und der Zusammenhang in eine dimensionslose Form überführt werden. Der Experimentator ist an dieser Stelle prinzipiell frei in deren Definition.

In Abweichung von der VDI 3783 Blatt 2 wurden in dieser Arbeit die Tunnelbreite  $b_T$  als charakteristisches Maß der Länge sowie  $\bar{u}_S$  als Maß der Geschwindigkeit verwendet:

$$L_{cCT} = b_T, \quad U_{cCT} = \bar{u}_S, \quad T_{cCT} = b_T/\bar{u}_S \quad (3.2), (3.3), (3.4)$$

Grund ist, dass im vorliegenden Fall des geometrisch vordefinierten Modellgebiets (siehe nächster Abschnitt) der Wunsch nach Variation des Quellvolumenstroms im anderen Fall eine ständige Änderung der dimensionslosen Abmaße zur Folge hätte. Im Hinblick auf eine spätere, kompakte

und verallgemeinerbare Darstellung der Ergebnisse ist es also zweckmäßiger, die Bezugsgrößen von der Freisetzungsrates zu entkoppeln.

Die noch fehlende charakteristische Zeit ergibt sich als Quotient aus  $L_{ccT}$  und  $U_{ccT}$ . Zur eindeutigen Abgrenzung von den in der VDI-Richtlinie definierten werden die charakteristischen Größen nachfolgend zusätzlich mit einem T für Tunnel im Index versehen.

Hiermit kann die Funktion  $f_1$  in die folgende dimensionslose Form  $f_2$  überführt werden:

$$c = f_2 \left( \frac{x}{L_{ccT}}, \frac{y}{L_{ccT}}, \frac{z}{L_{ccT}}, \frac{y_Q}{L_{ccT}}, \frac{z_Q}{L_{ccT}}, \frac{h_T}{L_{ccT}}, \alpha_T, \beta_T, \frac{l_{iH}}{L_{ccT}}, \frac{b_{iH}}{L_{ccT}}, \frac{h_{iH}}{L_{ccT}}, \frac{x_{iH}}{L_{ccT}}, \frac{\Delta\rho_Q}{\rho_S}, \frac{L_Q}{L_{ccT}}, \frac{U_{ccT}}{U_Q} = Fr_D, \frac{L_{ccT} \cdot U_Q \cdot \rho_Q}{\mu_Q} = Re_Q, \frac{L_{ccT} \cdot U_{ccT} \cdot \rho_S}{\mu_S} = Re_T \right) \quad (3.5)$$

Dabei ist  $\rho_Q$  durch die Dichtedifferenz  $\Delta\rho_Q = \rho_Q - \rho_S$  ersetzt worden. Weiterhin entsprechen  $L_Q$  und  $U_Q$  den nach Gleichung (2.6), (2.7) und (2.8) definierten Größen der quellbezogenen Beschreibung der VDI-Richtlinie. Zur Kenntlichmachung, dass es sich bei diesen im vorliegenden Fall nicht mehr um die problemcharakterisierenden Bezugsgrößen handelt, ist ihr Index von  $cc$  auf  $Q$  geändert worden.

Die drei zuletzt aufgeführten Terme in Gleichung (3.5) entsprechen ihrer Reihenfolge nach den bekannten Ähnlichkeitskennzahlen der densimetrischen Froudezahl, der quellspezifischen und der tunnelspezifischen Reynoldszahl.

Für eine umfassende Analyse der Ausbreitung im Tunnel sind nunmehr die dimensionslosen Einflussparameter aus Gleichung (3.5) über ihren szenariorelevanten Bereich zu variieren. Es wird dabei analog der VDI-Richtlinie angenommen, dass das Dichteverhältnis keinen unmittelbaren Einfluss auf die Konzentration hat, was dem Boussinesq-Ansatz entspricht.

## 3.2 Versuchsaufbau – der Modellversuchsstand

### Modellgeometrie

Abbildung 3-2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Kleinversuchsstandes, der das Modellgebiet geometrisch determiniert. Den Ausgangspunkt für die Nachbildung der gewölbeförmigen Tunnelgeometrie bildete eine Stahlröhre (Pos. 1) aus dem unterirdischen Erdgasleitungsbau mit einem Innendurchmesser von 800 mm ( $= b_T$ ) und einer Länge von 4000 mm. Unter Anlehnung an einen zweispurigen richtliniengemäßen Straßentunnel (RQ11t) ergibt sich ein geometrischer Maßstabsfaktor von nahezu exakt 12, um den der Modelltunnel zum Original verkleinert war. In die Röhre wurde auf einem Aluminiumrahmengerüst (Pos. 2) eine Fahrbahnoberfläche (Pos. 3) aus einzelnen aneinandergereihten Polyvinylchlorid-Platten mit einer Dicke von 10 mm eingebracht.

Die Einbauhöhe der Fahrbahn wurde so gewählt, dass die Querschnittsform der Röhre den repräsentativen Entwurfsunterlagen für gewölbeförmige Tunnel der *ASFINAG* [12] entsprach. Der Fahrbahnaufbau teilte die Röhre folglich längs zweckmäßig in zwei funktional unabhängige Gebiete – in das Modellgebiet und in einen Bereich unterhalb der Fahrbahn, der der Unterbringung der Systeme zur Gasversorgung und zur Gasanalyse vorbehalten blieb.

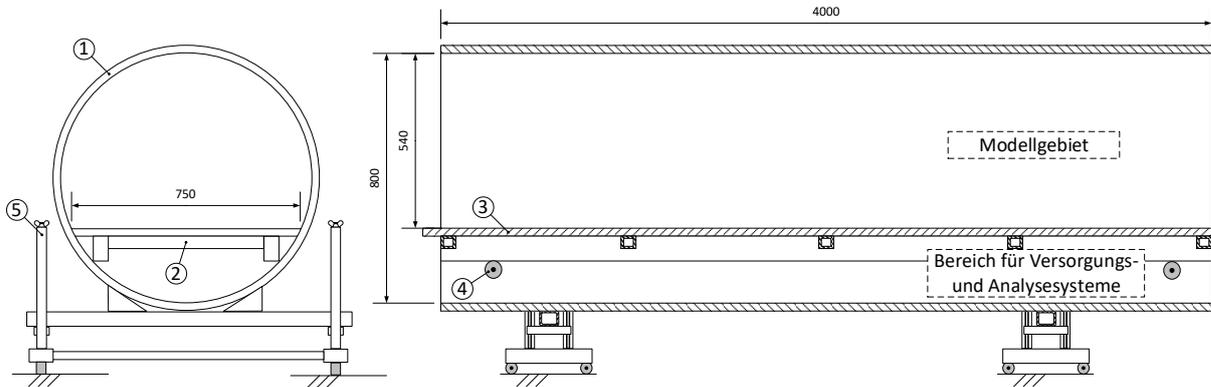


Abbildung 3-2: Modellgeometrie des Kleinversuchsstandes; Stahlröhre (Pos. 1), Aluminiumrahmengerüst (Pos. 2), Fahrbahnoberfläche (Pos. 3), Rollen (Pos. 4), Lafettenwagen (Pos. 5)

Der Aluminiumunterbau wurde darüber hinaus als Schlitten konzipiert und auf Rollen (Pos. 4) gelagert. Durch die konkave Innenform der Röhre ließ sich der Schlitten sodann auch in einer gekippten Ausrichtung in der Röhre positionieren. Auf diese Weise wurde in den späteren Versuchen die Querneigung der Fahrbahn nachgebildet. Die Röhre selbst wurde zudem auf zwei Lafettenwagen (Pos. 5) gelagert. Über ein Betätigen der in die Wagen integrierten Gewindespindeln konnte die Röhre in ihrer Gesamtlängslage angepasst und dem Fahrbahnboden zusätzlich entsprechend eine Längsneigung aufgeprägt werden.

### Strömungsnachbildung und Erfassung

Die notwendige Zwangslängsströmung im Modellgebiet wurde durch einen am Röhrenaussgang positionierten, handelsüblichen Axialventilator des Typs *CasaFan DF 800* realisiert, der Luft durch die Röhre ansaugte (Abbildung 3-3 Pos. 1). In dieser Anordnung wurde eine unerwünschte Einflussnahme des Ventilators auf das tunnelinnere Strömungsfeld größtmöglich vermieden. In Verbindung mit einem dem Ventilator elektrisch vorgeschalteten Wechselspannungssteller (Pos. 2) des Typs NS 4033 von *FG-Elektronik* war der Ventilator zudem in seinem Fördervolumenstrom stufenlos regelbar. Um im Weiteren ein gleichmäßiges Strömungsfeld mit möglichst homogener Wirbelstruktur über die Länge der Röhre zu verwirklichen, wurde zum einen der gegenüberliegende Rohreinlauf mit einer Einlauflippe (Pos. 3) ausgerundet und zum anderen ein Gitternetz (Pos. 4) mit einer Maschenweite von 5 mm über den Einlassquerschnitt aufgespannt.

Die Eigenschaften der Strömung im Versuchsgebiet wurden mit dem System der *Dantec Dynamics A/S* bestehend aus vier 1D-Hitzdrahtanemometern (HDA) (Pos. 5), Messverstärker (Pos. 6) und

A/D-Wandler (Pos. 7) erfasst, welches zur Bedienung des Systems sowie zur Speicherung und Visualisierung der Messergebnisse mit einem PC (Pos. 8) verbunden wurden.

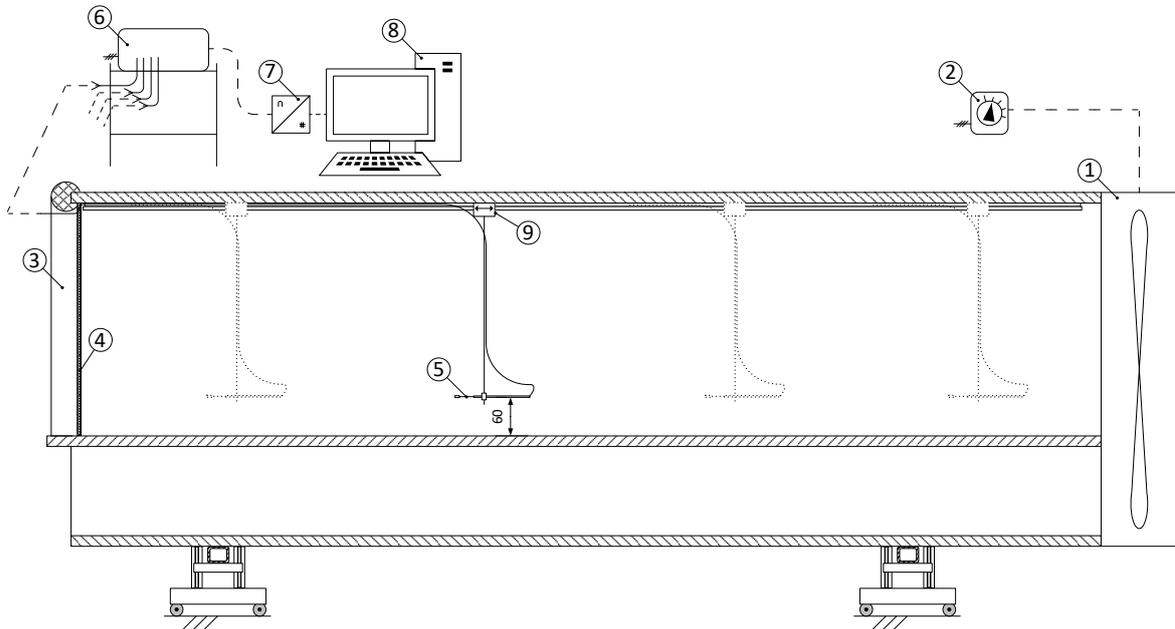


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Einbauten zur Nachbildung und Erfassung der Strömung im Modellversuchsstand; Axialventilator (Pos. 1), Wechselspannungssteller (Pos. 2), Einlaufrippe (Pos. 3), Gitternetz (Pos. 4), 1D-Hitzdrahtanemometern (Pos. 5), Messverstärker (Pos. 6), A/D-Wandler (Pos. 7), PC (Pos. 8), Schienensystem (Pos. 9)

Das Messprinzip der 1D-Sonden beruht physikalisch auf der Abkühlung eines temperierten Drahtes durch Konvektion bei Anströmung mit einem kühleren Medium. Dadurch wird der ohmsche Widerstand des Drahtes, der in einer Wheatstone'schen Brücke verschaltet ist, herabgesetzt, was zu einer Brückenspannung führt. Bei dem hier eingesetzten Constant Temperature Anemometer (CTA) wird eine die Spannungsdifferenz ausgleichende Heizspannung aufgebracht, die auf die Strömungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden kann. Der funktionale Zusammenhang zwischen beiden Größen ist im Kalibriervorgang zu bestimmen. Einzelheiten hierzu sind im Anhang A1 bereitgestellt. Um für die Turbulenzmessung ein entsprechend schnelles Ansprechverhalten zu realisieren, ist der Draht der Sonden generell sehr dünn ausgeführt, womit sie in der Praxis äußerst behutsam zu behandeln sind.

1D-Sonden verfügen nur über einen Sondendraht, weshalb nur eine, die dem Draht senkrechte Komponente der Strömung erfasst werden kann. Für Röhren lässt sich der Geschwindigkeitsvektor der Strömung damit dennoch hinreichend gut erfassen, da die axiale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit als deutlich größer angenommen werden kann als die radiale und die azimutale. Radiale Bewegungen sind rein turbulenzbedingt und gleichen sich im Mittel aus. Unbesehen dessen ist auf die orthogonale Ausrichtung der Sonde zur Hauptströmung zu achten. Diese ist

am besten erreichbar, indem der Sensor stirnseitig angeströmt wird, so dass ein axiales Verdrehen keine Auswirkungen auf die Orthogonalität zur axialen Strömung besitzt. Diese Maßgabe bedingte eine vollständige Installation der Sonde (Sondenkopf und -halter) in das Modellgebiet. Realisiert wurde dies über ein zusätzlich im Tunnelfirst befestigtes Schienensystem (Pos. 9), von dem die Sonden gehalten und bis auf unterschiedliche Höhen über der Fahrbahn abgespannt wurden sowie bei Bedarf händisch über die gesamte Modelllänge axial traversiert werden konnten. Der bodennahe Bereich über der Fahrbahnoberfläche konnte auf diese Weise frei von Einbauten gehalten werden. Auf eine umströmungsgünstige Form des Halters wurde geachtet. Fehler bei der Messung können sich indes aus nicht akkurat parallel zur Tunnellängsachse ausgerichteten Messsonden ergeben.

### Gasfreisetzung

Das System zur Bereitstellung des Gasmassenstroms bestand aus einem Gasreservoir, einer Einheit zur Massenstromeinregulierung und der Quellgeometrie an der eigentlichen Gaseinleitungsstelle (Abbildung 3-4).

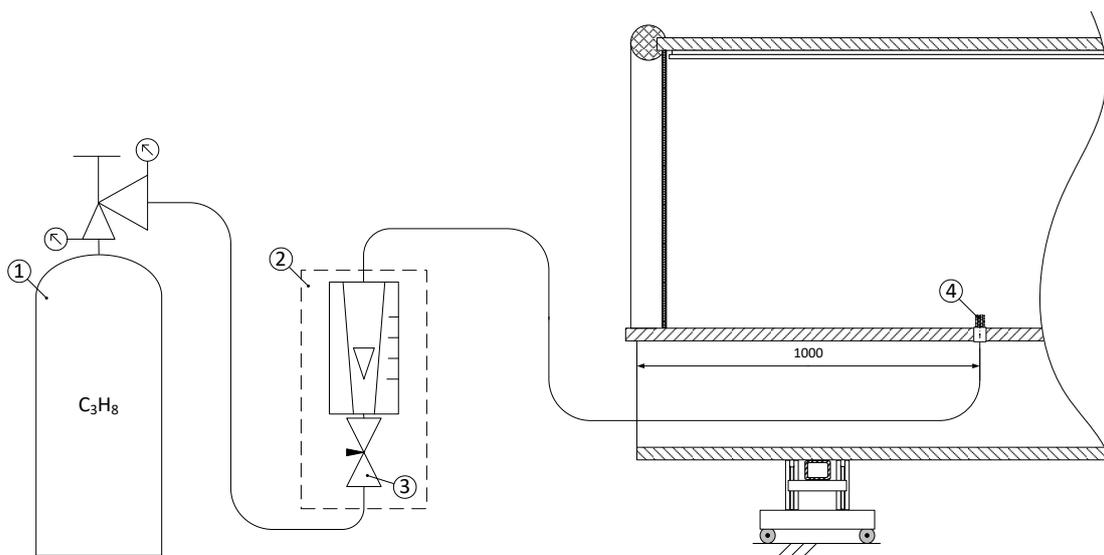


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Gaszuführung im Modellversuchsstand; Propangasflasche (Pos. 1), Schwebekörperdurchflussmesser (Pos. 2), Nadelventil (Pos. 3), poröse Fritte (Pos. 4)

Die Gasentnahme erfolgte bei den Versuchen aus einer in näherer Umgebung des Versuchsstands und über eine Schlauchverbindung mit der Quelle verbundenen, handelsüblichen Propangasflasche (Pos. 1) mit einem Füllgewicht von 33 kg. Das in den Modellversuchen eingesetzte Propan besaß eine Reinheit von größer gleich 99,5 %.

Zwischen Gasreservoir und Quelle wurde zur Erfassung der Freisetzungsrates ein Schwebekörperdurchflussmesser (Pos. 2) installiert. Steuern ließ sich der Durchfluss am im Durchflussmesser

integrierten Nadelventil (Pos. 3). Der dem Reservoir in dieser Konfiguration dauerhaft entnehmbare Propanmassenstrom lag bei rund 2 g/s. Daneben standen für die Versuche Schwebekörperdurchflussmesser kleinerer Messbereiche mit feinerer Skaleneinteilung zur Verfügung, die ein präzises Einstellen auch von kleineren Massenströmen gestatteten.

Das Propan gelangte schlussendlich durch eine zylinderförmige, aufrecht durch die Fahrbahnoberfläche ragende Fritte (Pos. 4) von jeweils 10 mm Höhe und Durchmesser ins Modellgebiet. Die Fritte bestand aus gesinterter Bronze hoher Porosität. Der Quellkörper ragte in voller Höhe in die Modellumgebung hinein. Mit dieser Anordnung sollte das Gas weitestgehend impulsfrei sowie homogen allseitig über den Umfang und die Deckfläche der Fritte von der Quelle abströmen können. Die Gesamtfreisetzungsfläche belief sich auf circa 390 mm<sup>2</sup>. Die Quelle befand sich, ausgenommen der Untersuchungen zum Einfluss der Quellposition in Abschnitt 3.7.5, mittig der Fahrbahn in einer Entfernung von 1 m vom Rohreinlauf.

### Gasmesssystem

Im Versuchsgebiet wurden Gasproben zur Bestimmung der Propangaskonzentration gleichzeitig an zehn Stellen in Fahrbahnhöhe entnommen. Die Anordnung in der x-y-Ebene ist in Abbildung 3-5 gegeben. Diese Anordnung wurde über alle maßstäblichen Versuche beibehalten. Mit der Absicht die Konzentrationsverteilung entlang des Tunnels erfassen zu können, lagen auf der Symmetrieachse sechs Messpunkte (MP), die sich in gleichen Abständen von 416 mm (entspricht 5 m im Originalmaßstab) in Verlängerung der Quelle aneinanderreihen. Um Kenntnis über die laterale Verteilung der Konzentrationen und die Symmetrie der Ausbreitung zu erlangen, waren zusätzlich in den Entfernungen 1250 mm sowie 2500 mm von der Quelle symmetrisch jeweils zwei Messstellen seitlich in halber Entfernung zur Tunnelwand platziert.

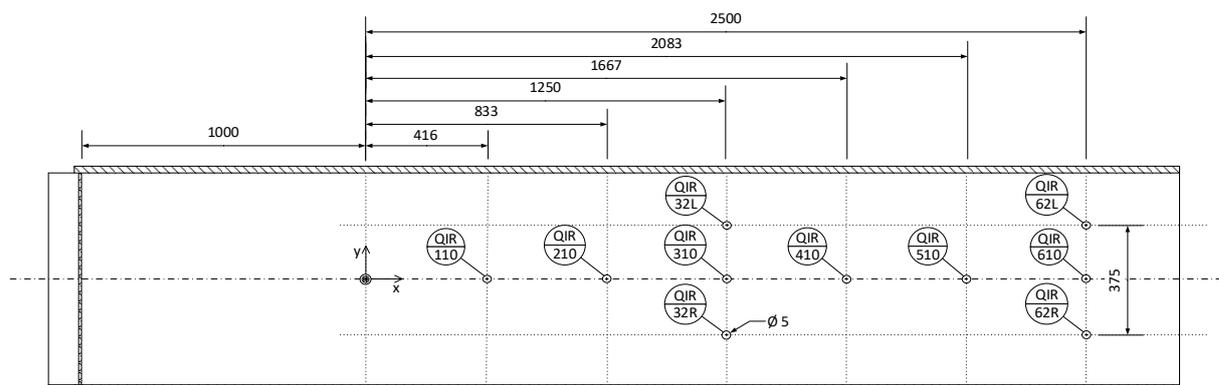


Abbildung 3-5: Anordnung der Messstellen zur Gaskonzentrationsmessung im Kleinversuchsstand

Abbildung 3-6 zeigt schematisch das System zur Erfassung der Gaskonzentration. Die Gaskonzentrationsmessung vollzog sich nach der folgenden Prozedur: An jeder der zehn Messstellen wurde ein lokaler Unterdruck erzeugt, von der die Gasprobe durch eine im Fahrbahnboden befindliche

Bohrung von 5 mm und über eine Schlauchleitung abgesaugt wurde. Nach einer Länge von 300 mm erreichte die Gasprobe den im jeweiligen Absaugtrag und unterhalb der Fahrbahn befindlichen Infrarotsensor (Pos. 1). Hier wurde die Probe im Moment des Durchströmens instantan auf ihre Propankonzentration hin analysiert. Nach Verlassen des Sensors wurden alle Einzelabsaugkanäle in Verteilerblöcken zu einem Gesamtstrom gebündelt, was die Verwendung von nur einer Pumpe zur Erzeugung des Unterdrucks an jeder der Messstellen ermöglichte. Die Einzelstränge wiesen in etwa gleiche Leitungslängen auf, so dass an den Messstellen gleiche Absaugbedingungen herrschten. Das analysierte Gas wurde dem Modellgebiet nicht wieder zugeführt.

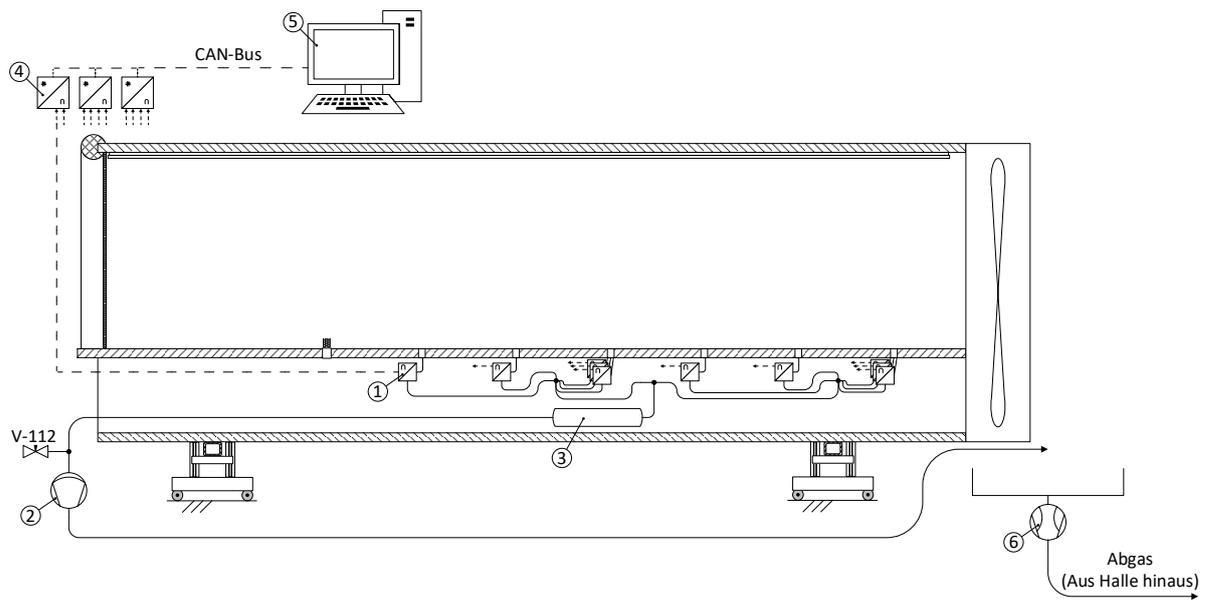


Abbildung 3-6: System zur Erfassung der Gaskonzentration im Modellversuchsstand; Infrarotsensor (Pos. 1), Förderpumpe (Pos. 2), Druckgasspeicher (Pos. 3), A/D-Wandler (Pos. 4), Messrechner (Pos. 5), Strahlpumpe (Pos. 6)

Die Förderpumpe (Pos. 2) befand sich außerhalb der Röhrengometrie. Es handelte sich um eine Membran-Vakuumpumpe des Typs *Vaccubrand ME2* mit einem maximalen Saugvermögen von  $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Pumpe ist für die Förderung explosionsfähiger Atmosphären geeignet. Im Probebetrieb zeigte sie ein äußerst diskontinuierliches Pumpverhalten, welches anfänglich auch deutlich an den Messstellen wahrnehmbar war. Durch Integration eines Druckgasspeichers (Pos. 3) in den Absaugweg stromaufwärts vor der Pumpe konnten beide Seiten voneinander entkoppelt werden. Der Speicher fungierte im Versuchsstand somit als Gaspuffer. Durch diese Maßnahme wurde ein in hohem Maße gleichförmiges Absaugen an den Messstellen erreicht. Über das Ventil V-112 ließ sich der Absaugtrakt zur Kalibrierung der Gastransmitter im eingebauten Zustand mit Referenzgas spülen.

Das Absaugen von Gasproben ist generell ein etabliertes Verfahren, welches in der Vergangenheit bereits von einigen Experimentatoren erfolgreich angewendet wurde (vgl. [40, 66, 70, 72, 82,

102]). Eine wesentliche Verfälschung des Verdünnungsvorgangs kann ausgeschlossen werden, da im Vergleich zum durch die Versuchsanordnung fließenden Volumenstrom vernachlässigbare Mengen des Umgebungsmediums kontinuierlich für die Analyse entnommen werden. Der zeitliche Versatz zwischen Auftreten einer bestimmten Gaskonzentration am Messort bis zur Detektion ist bei kontinuierlichen Freisetzungen nicht von Bedeutung.

Das Gasmesssystem aus Gastransmitter, Schlauchleitung, Verteilerstruktur sowie Druckgasspeicher fanden im verbliebenen nicht aktiv durchströmten Bereich der Röhre unterhalb der Fahrbahn ihren Platz, so dass die Versuchsumgebung frei von unerwünschten, potentiell den Ausbreitungsvorgang beeinflussenden Einbauten blieb. Alle Komponenten waren zudem ausschließlich am herauschwenkbaren Fahrbahnunterbaugerüst befestigt.

### **Gastransmitter**

Die eigentliche Konzentrationsmessung übernahmen Infrarot-Gastransmitter vom Typ *Dräger PIR 7000*. Im Gegensatz zu Pellistoren besteht bei Infrarotsensoren weder die Gefahr der chemischen Vergiftung, noch können sie durch zu hohe Brennstoffkonzentrationen unbrauchbar werden. Das Messprinzip beruht auf der Absorption von infrarotem Licht durch Kohlenwasserstoffbindungen (siehe Abbildung 3-7). Dazu wird Licht eines charakteristischen Wellenlängenbereichs von einer Lichtquelle (Pos. 1) ausgesendet, welches durch einen Interferenzfilter (Pos. 2) hindurch zum pyroelektrischen Detektor (Pos. 3) gelangt. Der dabei vom Licht zurückgelegte Weg bildet die Messstrecke. Gasmoleküle, die sich in diesem Weg befinden, werden durch das Licht zu Schwingungen angeregt und absorbieren hierdurch einen Teil des infraroten Lichtes. Die Unterschiede in den Intensitäten von ausgesendetem  $I_0$  zu empfangenem Licht  $I_1$  können bei Kenntnis des entsprechenden Absorptionskoeffizienten  $\epsilon_\nu$  bei der verwendeten Wellenlänge  $\nu$  sowie der optischen Länge  $d$  der Messstrecke nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz in die Konzentration  $c$  des spezifischen Zielgases umgerechnet werden.

$$\log(I_0/I_1) = \epsilon_\nu \cdot c \cdot d \quad (3.6)$$

Von Vorteil bei diesem Messprinzip ist überdies, dass das Gasgemisch beim Messvorgang lediglich passiv auf seine Konzentration hin analysiert wird und seine ursprüngliche Zusammensetzung behält. Beim *PIR 7000* befindet sich am Ende der Messküvette zusätzlich ein Reflektor (Pos. 4), an welchem das Licht gespiegelt wird, und so die Küvette ein zweites Mal durchläuft, womit die Gesamtmessstrecke  $d$  dem Doppelten der Messküvettenlänge entspricht und es erlaubt, die Sensorik konstruktiv sehr nah beieinander, geschützt in einem Gehäuse zu verbauen. Die Messstrecke verbleibt dagegen offen, sodass die Gasmoleküle ungehindert in sie eintreten können. Zudem werden über einen zweiten im nicht-absorbierenden Wellenlängenbereich betriebenen, pyroelektrischen Detektor (Pos. 5) etwaige Verschmutzungen der Optik sowie mittels eines weiteren IR-Strahlers

(Pos. 6) mögliche Abweichungen der IR-Detektoren kompensiert. Ein zusätzlicher, geräteinterner Referenzkanal erlaubt überdies die Temperaturkompensation des resultierenden Messsignals [8]. Alle drei Maßnahmen verbessern die Signalstabilität [9].

Auf Grundlage des Messprinzips gestattet der Gastransmitter prinzipiell die Detektion einer Reihe von im gewählten IR-Wellenlängenbereich absorbierenden Gasen. Um eine Fehlinterpretation des Messsignals zu vermeiden, ist das Zielgas dediziert im Vorhinein im Gastransmitter auszuwählen. Für den Praxiseinsatz resultiert daraus die Einschränkung, dass die Komponenten des zu analysierenden Gasmisches zur Messung bekannt sein müssen, so dass eine Beeinflussung des Messsignals durch Querempfindlichkeiten ausgeschlossen werden kann.

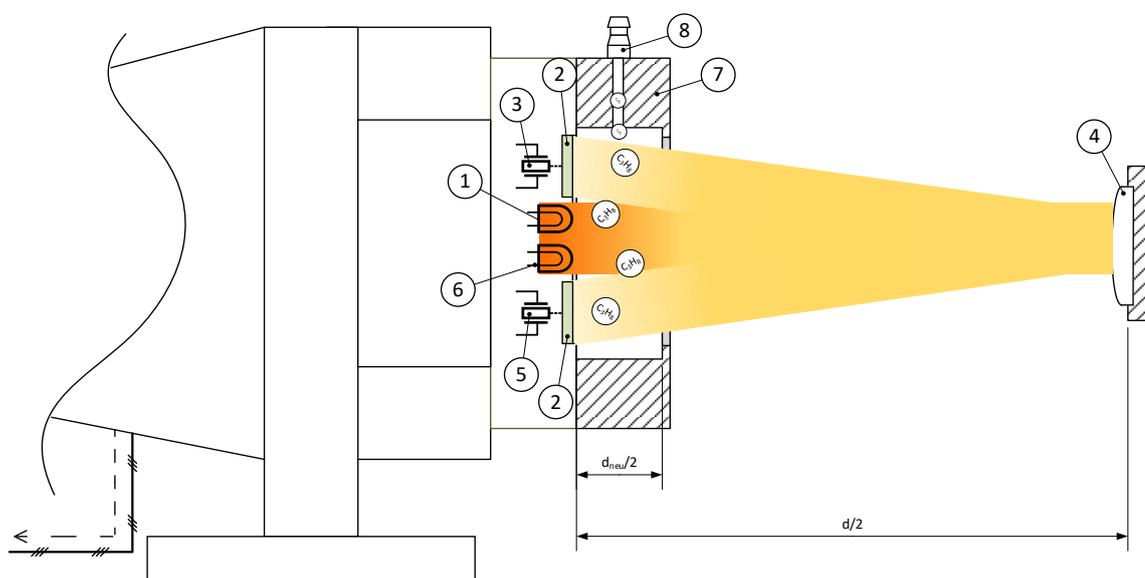


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Gastransmitter PIR 7000 mit adaptierter Flowcell; Lichtquelle (Pos. 1), Interferenzfilter (Pos. 2), pyroelektrische Detektoren (Pos. 3 und Pos. 5), Reflektor (Pos. 4), IR-Strahler (Pos. 6), Adapter „Flowcell“ (Pos. 7), Schlauchanschluss (Pos. 8)

Der Gastransmitter kann im Grundzustand eine Propankonzentration von 0–6 Vol-% detektieren. Unter den Bedingungen des Modellgebiets war zu erwarten, dass bei maximaler Steigerung der Freisetzungsrates die Propankonzentration insbesondere an den quellnächsten Messstellen sehr schnell den ausgewiesenen Messbereichsendwert überschreitet, was eine deutliche Beschränkung der im Versuchsstand messtechnisch erfassbaren Parameterkonstellationen darstellen würde. Der Gastransmitter wurde deshalb um den im Zubehör erhältlichen Adapter „Flowcell“ (Pos. 7) erweitert. Das Gas musste nunmehr über die Schlauchanschlüsse (Pos. 8) dem Transmitter zugeführt werden.

Der Adapter wird direkt in den Messkanal eingeführt und verkleinert den Bereich innerhalb der Messstrecke auf  $d_{new}$  welchen das Gasmisch nun noch fähig ist einzunehmen. Mit dieser Begrenzung befinden sich bei Analyse trotz gleichgebliebener Konzentration faktisch eine geringere

Anzahl von Gasmolekülen in der Messstrecke. Durch die integrale Messung gibt der Detektor so- dann ein proportional geringeres Messsignal aus. Damit tritt die Detektorsättigung erst bei höhe- ren „wahren“ Propankonzentrationen ein. Für Propan ist dem technischen Handbuch der Gas- transmitter ein Proportionalitätsfaktor von 4,2 zu entnehmen, um den der Messbereichsendwert mit dieser konstruktiven Maßnahme angehoben wird [8]. Für die Auswertung ist zu beachten, dass sich gleichzeitig im selben Maße die Messgenauigkeit des Gastransmitters verringert. In die- ser Messkonfiguration ist es letztlich nunmehr möglich, Propankonzentrationen von 0– 25,2 Vol-% zu detektieren. Vor Verwendung wurden alle so angepassten Gastransmitter einer er- neuten Nullpunkt- und Empfindlichkeitskalibrierung unterzogen, die im Anhang A2 ausgeführt ist.

Im in den Versuchen ausschließlich verwendeten „schnellen“ Messmodus werden die Konzentra- tionen mit einer Messrate von 1 Hz erfasst. Der Messwert wird dabei als analoges Spannungssig- nal ausgegeben. Das Signal wurde anschließend wie folgt elektronisch weiterverarbeitet: Die Ana- logsignale wurden an separaten modularen Schnittstellen (Abbildung 3-6 Pos. 4) in digitale Form umgesetzt und auf einem CAN-Bus zum Messrechner (Abbildung 3-6 Pos. 5) übertragen. Als Mess- werterfassungssystem diente die Software DASYLab 2016, mit deren Hilfe die Verläufe der Kon- zentration grafisch dargestellt und gesammelt in Zeitreihen gespeichert wurden. Bei der Mess- wertausgabe ist der durch die Flowcell bedingte Umrechnungsfaktor zu berücksichtigen.

## **Hindernisse**

Neben Messungen im leeren, hindernisfreien Tunnel ist es das Anliegen der Arbeit, Ausbreitungen im Modellgebiet unter Anwesenheit von Hindernissen zu untersuchen. Hierbei handelte es sich um einfache geometrische Hindernisse, wie den Würfel und den Quader. Diese Formen stellen im Hinblick auf die Abbildung realer Fahrzeugformen zwar eine erhebliche, möglicherweise unzuläs- sig starke Vereinfachung dar, aufgrund der folgenden Überlegungen besitzt ihre Verwendung aber entscheidende Vorteile: Zum einen ist die Wahl eines als repräsentativ angesehenen Modells aus der Vielzahl von realen Fahrzeugformen stets subjektiv beeinflusst, weshalb die Repräsentativität der Ergebnisse in Frage gestellt wäre. Zum anderen sind einfache Formen trotz ihrer komplexen Wirbelablösungen an den Ablösekanten vergleichsweise gut in ihren prägenden Formen strö- mungstechnisch untersucht, was vorteilhaft für die spätere Detailauswertung ist. Des Weiteren ergeben sich vielmehr aufgrund der starken Ablösungserscheinungen die vergleichsweise groß- flächigsten Turbulenzgebiete mit den stärksten Fluktuationen. Es sollte sich damit innerhalb der Versuche der extremste Einfluss, den Hindernisse auf die Ausbreitung nehmen können, ergeben.

Die Hindernisse wurden aus gehobeltem Konstruktionsholz mit einer vernachlässigbar geringen Rauigkeit der Oberflächen gefertigt.

## **Weitere Randbedingung**

Um den Einfluss äußerer Strömungen so gering wie möglich zu halten, wurde der Versuchsstand innerhalb einer großräumigen Halle errichtet. Die Umgebungstemperatur über alle Versuche wies einheitlich ca. 20 °C auf. Die Messwarte wurde in der Nähe der Modellröhre eingerichtet.

## **Sichere Versuchsdurchführung**

Der Aufbau in der Halle in Verbindung mit der kontinuierlichen Freisetzung eines brennbaren Gases verlangte im Sinne einer sicheren Versuchsdurchführung nach einem umfassenden Sicherheitskonzept, dass vorrangig auf die vollständige Vermeidung der Ansammlung von Propangas in der Halle abzielte. Folgende Überlegungen, die im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung vorgenommen wurden, führten zu folgenden Maßnahmen:

- Nach überschlägigen Rechnungen ist auch bei maximal möglichen Freisetzungsraten und -dauern generell nur mit einer begrenzten explosionsfähigen Atmosphäre oberhalb der Modellfahrbahn zu rechnen. Der innere Bereich im Modelltunnel oberhalb der Fahrbahn wurde in die explosionsgefährdete Zone 0 gemäß Gefahrstoffverordnung eingeteilt.
- Der Hauptstrom verließ die Modellröhre durch den Ventilator. Der Ventilator ist eine wirksame Mischvorrichtung; stellt nach eigenen Messungen selbst aber keine effektive Zündquelle dar. Messungen bei Inbetriebnahme direkt hinter dem Ventilator ergaben Propangaskonzentrationen deutlich unterhalb der UEG.
- Das Vorliegen explosionsfähiger Atmosphären außerhalb der Röhre wurde demnach als selten eingestuft. Eine Zündung innerhalb der Röhre galt in radiale Richtung durch die konstruktiv robuste Ausführung der Wände als unerheblich bezüglich des Personenschutzes. Die Bereiche in Richtung der Rohröffnungen wurden während der Versuchszeiten weiträumig (> 3 m) abgesperrt.
- Das Gasgemisch hinter dem Ventilator war hingegen zwingend abzuführen. Hierfür wurde eine effektive bodennahe Absaugung installiert. Über eine Strahlpumpe (Abbildung 3-6 Pos. 6) wurde das Gas durch einen Schlauch aus der Halle ins Freie geführt. Die Strahlpumpe arbeitete rein pneumatisch unter Nutzung der Hausdruckluftversorgung, so dass keine zusätzliche Zündgefahr von der Einrichtung ausging.
- Das dem Hauptstrom entnommene Analysegas wurde ebenfalls direkt zur Absaugung geführt.
- Im Bereich der Messwarte wurde ein Gaswarngerät stationiert; ein weiteres war permanent vom Versuchspersonal zu tragen.

Die Abbildungen in Anhang A3 zeigen den realen Modellversuchsstand im versuchsbereiten Vollausbau.

### 3.3 Modellskalierung und Anwendungsgrenzen

Aus den folgenden Ähnlichkeitsbetrachtungen leiten sich in Bezug auf die Originalausbreitung die konkret zu wählenden Parametereinstellungen für den Versuchsbetrieb sowie die Grenzen des darstellbaren Parameterbereichs im Modellversuchsstand ab.

Der maßstäbliche Betrieb der Versuchseinrichtung erfordert die Kenntnis der individuellen Skalierungsfaktoren. Die gesuchten Skalierungsfaktoren  $\lambda$  sind dabei die Proportionalitätsfaktoren zwischen den charakteristischen Größen der Ausbreitung im Modell und der im Original.

$$\lambda_L = \frac{L_{ccT\_Original}}{L_{ccT\_Modell}} \quad (3.7)$$

$$\lambda_U = \frac{U_{ccT\_Original}}{U_{ccT\_Modell}} \quad (3.8)$$

$$\lambda_T = \frac{T_{ccT\_Original}}{T_{ccT\_Modell}} \quad (3.9)$$

Mit den Abmessungen der Modellröhre in Entsprechung eines zweispurigen Straßentunnels ist  $\lambda_L$  bereits geometrisch mit einem Wert von 12 festgelegt.

Der Geschwindigkeitsfaktor  $\lambda_U$  folgt aus den Ähnlichkeitsbetrachtungen. Dabei gilt zu beachten, dass im konkreten Fall das identische Schwergas (Propan) in den kleinmaßstäblichen Versuchen eingesetzt wird, so dass das Dichteverhältnis aus Gl. (3.5) bzw. die effektive Fallbeschleunigung  $g_{eff}$  nach Gl. (2.5) der des Originals entspricht. Aufgrund des in Abschnitt 2.2.2.2 beschriebenen Zielkonflikts zwischen Fr-Zahl und Re-Zahl können bei Änderung des Maßstabs nicht gleichzeitig beide Kennzahlen eingehalten werden. Wie in vergleichbaren kleinmaßstäblichen Schwergasuntersuchungen wird auch in dieser Arbeit dabei der Froudezahl der Vorrang eingeräumt. Das Gleichsetzen von  $Fr_{D\_Original}$  und  $Fr_{D\_Modell}$  nach den Ausdrücken in Gl. (2.4) unter Berücksichtigung von  $L_{ccT\_Original} = 12 \cdot L_{ccT\_Modell}$  führt damit auf  $\lambda_U = \sqrt{12}$ . Der verbleibende Zeitfaktor berechnet sich über den einfachen Zusammenhang  $\lambda_T = \lambda_L/\lambda_U$  ebenfalls zu  $\sqrt{12}$ .

Diese Ergebnisse bedeuten für den Versuchsbetrieb, dass zur Nachbildung der Tunnelströmung die Strömungsgeschwindigkeit um ca. das 3,5fache niedriger als im Original zu wählen ist. Zudem läuft die Ausbreitung dann um ca. das 3,5fache schneller ab, als es im Original zu beobachten ist. Neben der Strömungsgeschwindigkeit war im Versuchsstand außerdem die Freisetzungsrates vorzugeben. Der Faktor für den Volumenstrom errechnet sich durch Einsetzen von  $L_Q$  in Gl. (3.7) und

Umstellen nach  $\dot{V}_0$ . Hieraus ergibt sich mit der Dichte für Propan ein Massenstromfaktor von  $\lambda_m = 12^{5/2}$ . Der Propanmassenstrom ist demnach um ca. das 500fache kleiner zu wählen als im Original. Auf die resultierenden Konzentrationswerte ist dagegen kein Skalierungsfaktor mehr anzuwenden. Unter den genannten Voraussetzungen besitzen diese maßstabsunabhängige Gültigkeit. Abbildung 3-8 zeigt die sich aus den Ähnlichkeitsbetrachtungen ergebenden Umrechnungsdiagramme zur Einstellung der Parameter Massenstrom und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit im Modellversuch.

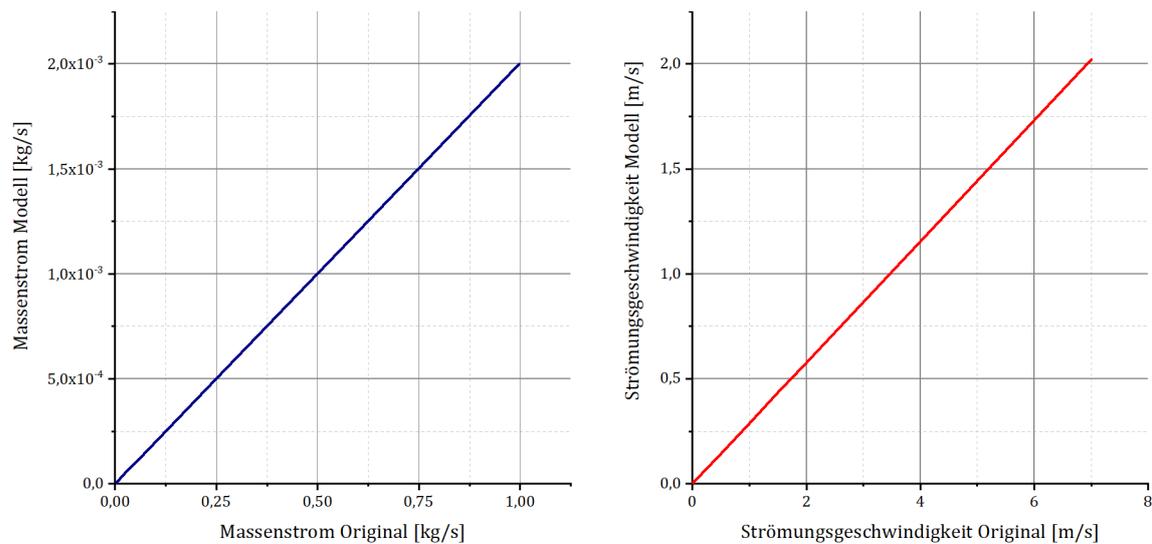


Abbildung 3-8: Diagramme zur Umrechnung der Parameter Massenstrom (links) sowie der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (rechts) von Original- zu Modellmaßstab

Aus den Diagrammen lassen sich anschaulich die wesentlichen Betriebsgrenzen des Modellstandes herauslesen. Im Versuch konnten unter Berücksichtigung der maximal möglichen Freisetzungsrates von  $2 \text{ g/s}$  Propan zu realen Massenströmen von bis zu  $1 \text{ kg/s}$  nachgebildet werden. Dieser entspricht überschlägig jenem, der unter konservativer Annahme eines rein flüssigen Austritts von Propan bei einer Ausflussziffer von  $0,62$  nach der Bernoulli-Gleichung bei einem Tankleck mit dem Lochdurchmesser von  $d = 8 - 10 \text{ mm}$  austritt (Leckgröße nach [24] repräsentativ für den Ventilabriss bei Druckgefäßen). Zum anderen erreicht die Strömungsgeschwindigkeit im Modell bei voller Ventilatorleistung einen Wert von über  $2 \text{ m/s}$ , so dass der regelbare Betriebsbereich der Längslüftung in Straßentunneln von bis zu  $6 \text{ m/s}$  im Modell ebenfalls realisierbar ist. Die untere Grenze bildet indes die kritische Rohrreynoldszahl von  $2300$ . Sie ist im hindernisfreien Modellgebiet bereits bei Strömungsgeschwindigkeiten größer  $0,05 \text{ m/s}$  überschritten.

### 3.4 Untersuchungen der Strömungsbedingungen im Modellgebiet

Basis einer Analyse der Ausbreitung bildet die hinreichende Kenntnis der Strömungsverhältnisse im Modellgebiet. Die strömungstechnische Auslegung des Versuchsgebiets wurde im Rahmen einer Masterarbeit [26] vorgenommen. Zielsetzung war, den Versuchsstand soweit zu ertüchtigen,

dass im Sinne der Annahme eines charakteristischen Tunnelausschnitts im hindernisfreien Grundzustand ein gleichmäßig turbulenzarmes Strömungsprofil über die Länge des Modellgebietes besteht. Die im Folgenden dargebotenen Daten sind der Masterarbeit entnommen. Es werden an dieser Stelle nur die Strömungseigenschaften im Ausgangszustand sowie im Endausbau präsentiert. Für die Zwischenresultate des iterativen Prozesses aus Erfassung der Strömungseigenschaften und Versuchsstandanpassung, die zur Installation einer Einlauflippe sowie eines Gitternetzes führten, wird auf *Babul* [26] verwiesen.

Vier ortsveränderliche Hitzdrahtsonden erfassten die Strömungsgeschwindigkeit bei Nennbetrieb des Ventilators. Die Abtastung erfolgte jeweils für eine Sekunde mit einer Frequenz von 1 kHz. Ein Messblock umfasst 60 dieser Einzelmessungen, die automatisiert vom Messprogramm in kurzer Folge durchlaufen wurden. Die Sonden wurden über eine Art Messrechen gehalten, der seinerseits am deckenseitigen Schlitten-Schienen-System befestigt war. Mit diesem wurden die Sonden zwischen den Messblöcken axial über die Tunnellänge traversiert. Abbildung 3-9 zeigt im Ergebnis den Mittelwert  $\bar{u}$  sowie die Standardabweichung  $\bar{u}_{RMS}$  der axialen Strömungsgeschwindigkeit in der Messhöhe  $z = 0,1625b_T$  für die diskreten axialen Messpositionen.  $x = 0,0$  ist identisch mit der Quellposition. Der dargestellte Wert entspricht dem Mittel aus den drei parallel in der Messebene positionierten HDA.

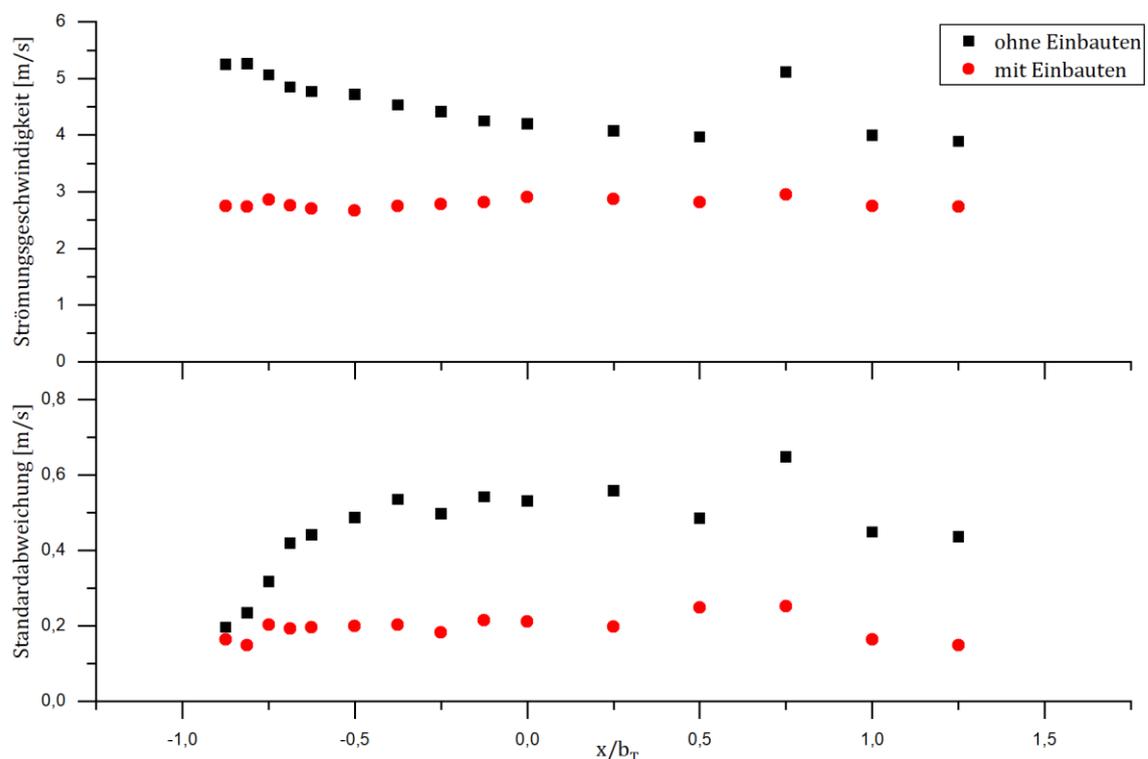


Abbildung 3-9: Vergleich der Strömungseigenschaften anhand der longitudinalen Profile von  $\bar{u}$  (oben) und  $\bar{u}_{RMS}$  (unten) im Modellversuchsstand ohne und mit strömungstechnischen Einbauten in einer Messhöhe von  $z = 0,1625b_T$  bei Ventilatornennbetrieb (basierend auf Daten aus [26])

Im Vergleich zur Ausgangssituation konnte mit den konstruktiven Maßnahmen eine über die Tunnellänge annähernd gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit bei zum Ursprung mehr als halbiertes und annähernd einheitlicher Standardabweichung erreicht werden. Die als Quotient aus  $\bar{u}_{RMS}$  und  $\bar{u}$  definierte Turbulenzintensität  $Tu$  beträgt im Mittel etwa 7 %. Diese Bedingungen wurden als ausreichend geeignet für die weiteren Untersuchungen eingestuft.

Eine detaillierte Untersuchung der Strömungsbedingungen an der unteren strömungsseitigen Einsatzgrenze des Versuchsstandes wurde im Zuge der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Skalierungsverifizierung bei einer Ausgangsströmungsgeschwindigkeit  $\bar{u}_s$  von rund  $0,14 \text{ m/s}$  vorgenommen (Daten siehe Tabelle A-3). In diesem Fall wurden vier HDA mittels Messrechen in den lateralen Positionen  $y_1 = 0,468b_T$ ;  $y_2 = 0,234b_T$ ;  $y_3 = 0$ ;  $y_4 = -0,234b_T$  in einer Höhe  $z = 0,075b_T$  über der Fahrhahnoberfläche positioniert. Die im Vorderen genannten Abtastbedingungen wurden beibehalten, eine feinere axiale Auflösung wurde gewählt. Nach Abbildung 3-10 ergeben sich bei Geschwindigkeiten an der unteren Einsatzgrenze ebenso weitgehend gleichmäßige Strömungsbedingungen über das gesamte Strömungsgebiet. Aus den Werten errechnet sich im Mittel eine Turbulenzintensität im Modelltunnel von 16 %.

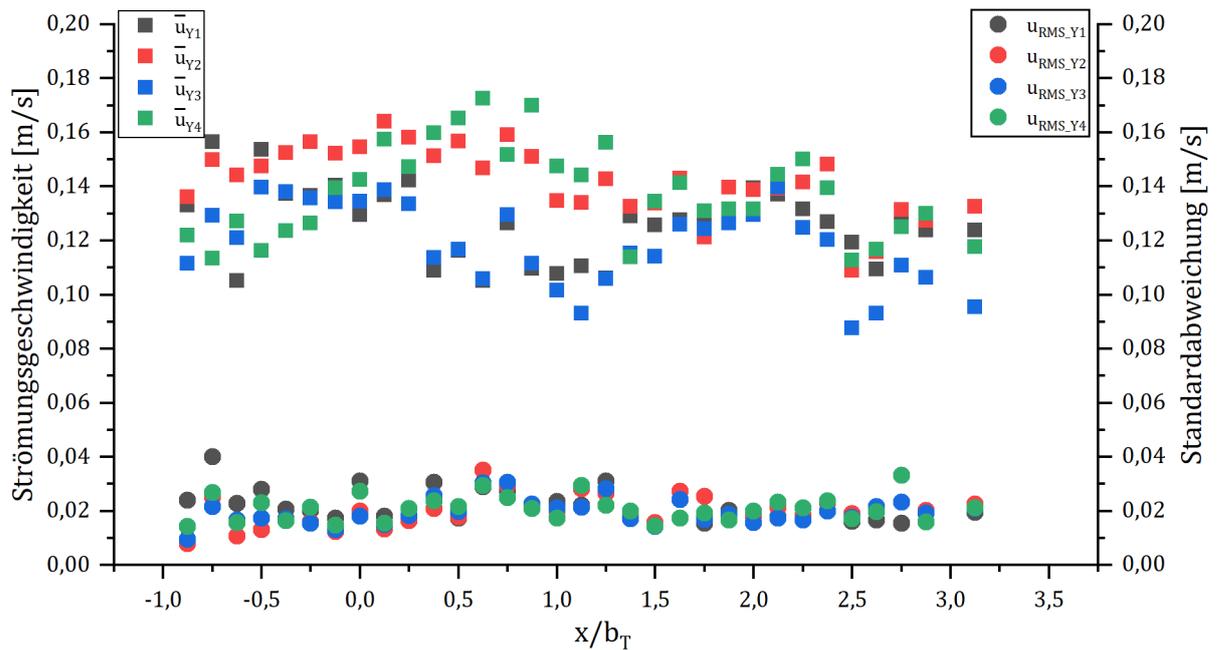


Abbildung 3-10: Longitudinale Profile von  $\bar{u}$  und  $u_{RMS}$  der HDA jeweils an den Positionen  $y_1 = 0,468b_T$ ;  $y_2 = 0,234b_T$ ;  $y_3 = 0$ ;  $y_4 = -0,234b_T$  im Modellversuchsstand in einer Messhöhe von  $z = 0,075b_T$  am unteren Einsatzbereich der Strömung

Eine Erklärung für die nunmehr doppelt so hohe Turbulenzintensität bietet die Auftragung der Entwicklung von  $\bar{u}_{RMS}$  und der davon abgeleiteten Turbulenzintensität  $Tu$  über die mittlere Tunnelströmungsgeschwindigkeit  $\bar{u}_s$  (Abbildung 3-11) anhand der Daten aus Tabelle A-4.

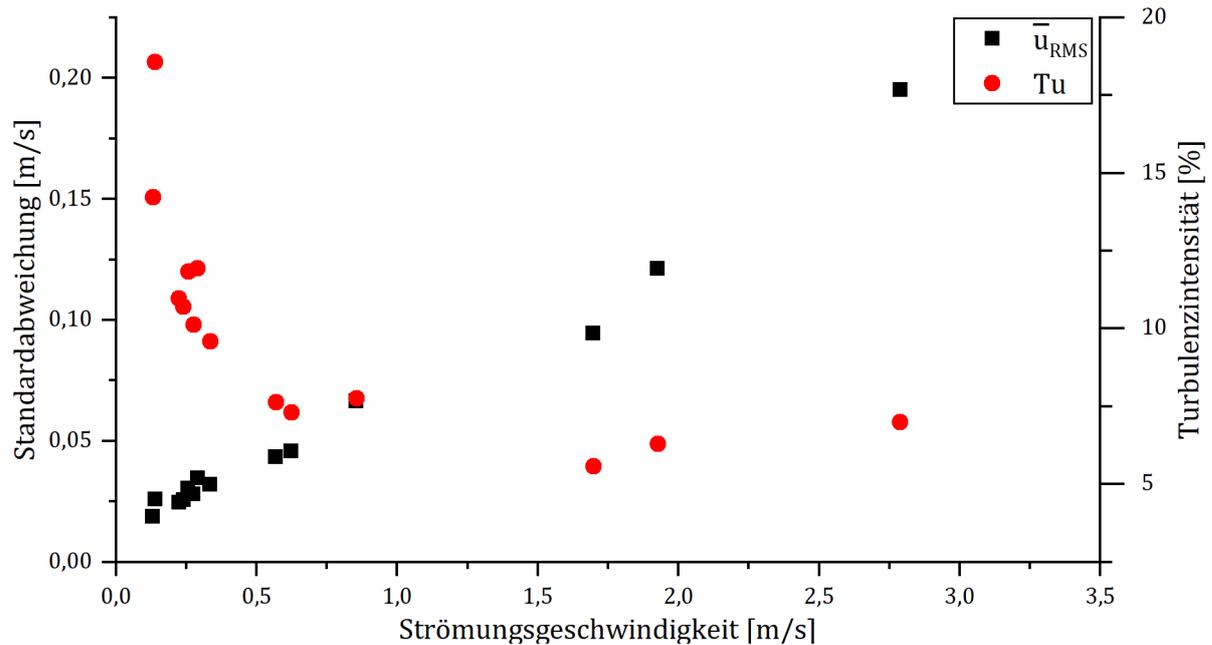


Abbildung 3-11: Standardabweichung  $\bar{u}_{RMS}$  und Turbulenzintensität  $Tu$  einiger Versuche im Modelltunnel aufgetragen über die zugehörige mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}_S$

Dargestellt sind neben den im Vorderen besprochenen Messpunkten für die obere und untere Einsatzgrenze Daten aus Messungen der Strömung, die im Zuge der eigentlichen Ausbreitungsversuche generiert wurden. In diesen waren die vier HDA auf der Symmetrieebene axial an den Positionen  $x_1 = -0,625b_T$ ;  $x_2 = 0$ ;  $x_3 = 1,5625b_T$ ;  $x_4 = 3,125b_T$  in der Messhöhe  $z = 0,075b_T$  fest installiert. Wie Abbildung 3-11 verdeutlicht, nimmt  $\bar{u}_{RMS}$  proportional mit  $\bar{u}_S$  zu. Demnach verschwindet die Fluktuation der Strömung mit Annäherung an eine mittlere Strömung von  $\bar{u}_S = 0 \text{ m/s}$  nicht vollständig. Die Strömung weist also auch in diesem Zustand eine Anfangsturbulenz von  $\bar{u}_{RMS} \leq 0,02 \text{ m/s}$  auf. Die Folge hiervon ist die augenscheinliche Intensivierung der Turbulenz bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten, die in der Größenordnung von  $\bar{u}_{RMS}$  liegen. Die Zunahme von  $Tu$  geht in diesem Fall somit nicht auf eine absolute Zunahme der Schwankungsbewegungen bei kleinen Geschwindigkeiten zurück – wie eine erhöhte Turbulenzintensität vermuten ließe – sondern auf eine relative, die auf der stets vorhandenen Anfangsturbulenz der Strömung beruht.

### 3.5 Versuchsdurchführung und Ergebnisdarstellung

Die Durchführung eines jeden Ausbreitungsversuchs gestaltete sich wie folgt:

- Zunächst wird die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit im Modellgebiet angefahren. Über den Onlinemessmodus der HDA wird diese permanent angezeigt bzw. auf Grundlage dieses Wertes bei Bedarf nachgeregelt.
- Die Strömungsbedingungen werden sodann für einen Zeitraum von etwa zwei Minuten erfasst (nur bei ausgewählten Versuchen vorgenommen; Übersicht siehe Anhang A11).

- Im nächsten Schritt wird das Propan mit der gewählten Freisetzungsrate (Propanvolumenstrom) in das Modellgebiet kontinuierlich eingeleitet und abgewartet, bis von stationären Ausbreitungsverhältnissen im Modellgebiet ausgegangen werden kann.
- Anschließend wird die Propankonzentration für ebenfalls zwei Minuten aufgezeichnet. Die Gastransmitter liefern im schnellen Modus einen Messwert pro Sekunde. Eine Messreihe umfasst damit mindestens 120 Einzelkonzentrationswerte, wie Abbildung 3-12 zeigt.

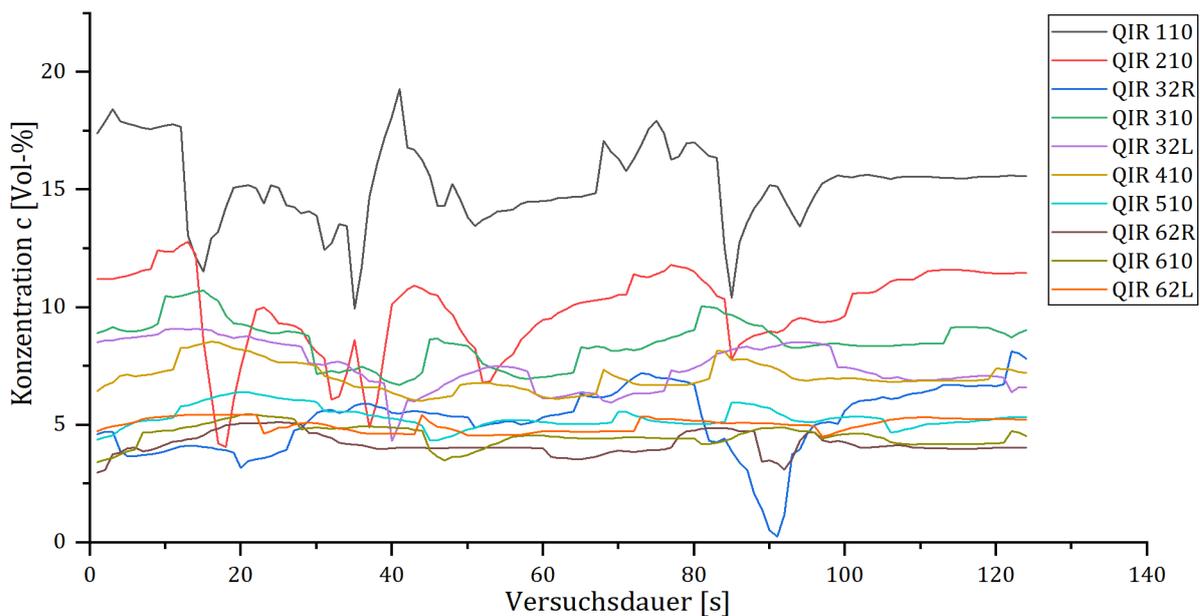


Abbildung 3-12: Exemplarisch der Mittelung zugrundeliegender Konzentrationsverlauf über die Aufzeichnungsdauer am Beispiel der Messreihe V2018-11-08\_13:35

Für jeden Messpunkt wird schließlich der zeitliche Mittelwert aus den aufgezeichneten Einzelwerten pro Messreihe nach Gleichung (3.10) ausgewertet:

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_i^N c'_i \quad (3.10)$$

Wie die Prüfung des Konvergenzverhaltens nach Abbildung 3-13 verdeutlicht, kann bei einer Messdauer von 2 min alsdann von einem repräsentativen Mittelwert ausgegangen werden.

Für die Auswertung des Verdünnungsverhaltens und der Parametereinflüsse wird in dieser Arbeit, bis auf wenige Ausnahmen, eine Darstellung der nach Gleichung (3.10) erhaltenen zeitlichen Konzentrationsmittelwerte über die longitudinalen Bodenkonzentrationen (entlang der Tunnel-längsachse) gewählt. Die Entfernung von der Quelle ist dabei dimensionslos als Vielfaches der Tunnelbreite aufgetragen (vgl. Abbildung 3-14). Sofern geeignet ist zudem die Ordinate auf eine

Skalierung von 0 Vol-% bis 25 Vol-% normiert worden. Dies soll dem Leser den schnellen Vergleich zwischen den Abbildungen im Hinblick auf den quantitativen Einfluss einzelner Parameter erlauben. Insoweit von den seitlich der Symmetrieebene liegenden Messpunkten kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn ausgeht, wird der Übersichtlichkeit halber auf ihre Darstellung im Diagramm verzichtet. Alle dargestellten Versuchsergebnisse sind in tabellierter Form im Anhang aufgeführt.

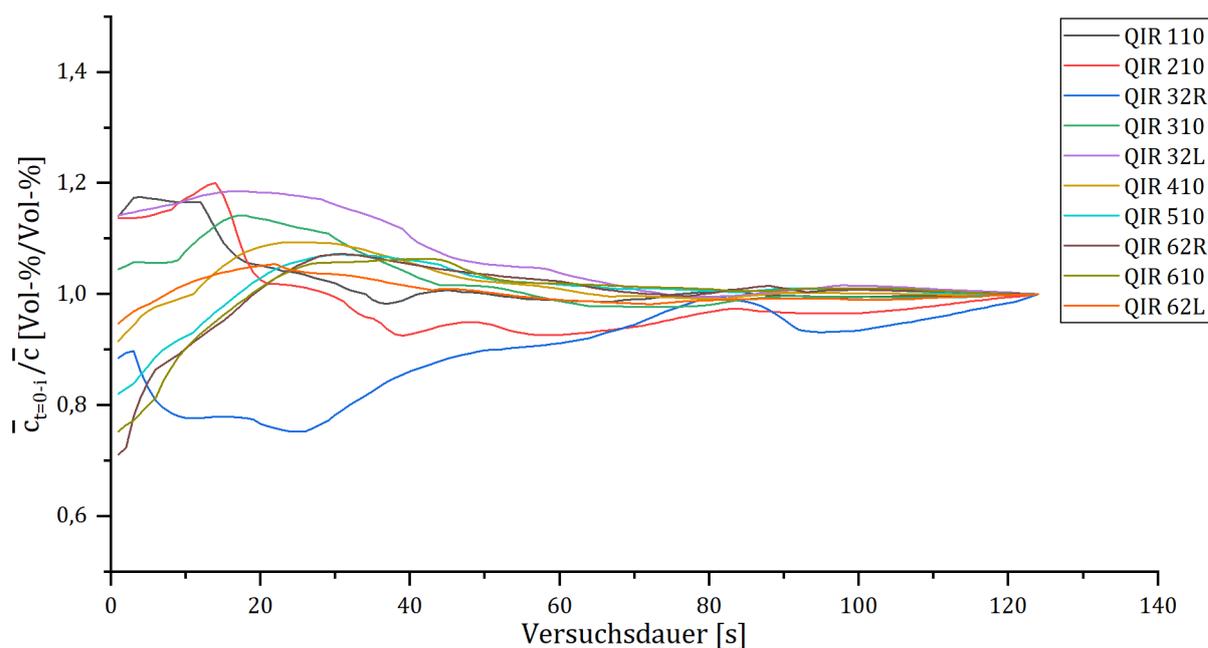


Abbildung 3-13: Konvergenzverhalten der Konzentrationsmittelwerte am Beispiel der Messreihen für V2018-11-08\_13:35; zeitliche Mittelung der Konzentrationen bis zum Zeitpunkt  $t = i$  bezogen auf Konzentrationsmittelwert über Gesamtmessdauer

Für die Versuche wurden außerdem zwei Standardkombinationen aus den möglichen Stufenkombinationen der Betriebsparameter festgelegt, in denen der Versuchstand bei allen nachfolgenden Untersuchungen vorrangig betrieben wurde. Sie wurden so gewählt, dass die unterschiedlichen praxisrelevanten Bereiche möglicher Leckagen weitgehend abgedeckt sind:

- Als Standardkombination 1 (Sk 1) ist die Kombination der Betriebsparameter in den Stufen  $\dot{V}_Q = 12 \text{ l/min}$  und  $\bar{u}_S = 0,28 \text{ m/s}$  ( $\cong Fr_D = 0,15$ ) definiert. Diese Kombination entspräche in der Realität einem freigesetzten Massenstrom von  $250 \text{ g/s}$ , wie sie für eine kleine Leckage aus einem Pkw-Fahrzeigtank typisch sein könnte, bei der im Normalbetrieb geforderten Mindestlüftungsgeschwindigkeit im Tunnel von  $1 \text{ m/s}$ .
- Bei Sk 2 ( $Fr_D = 0,05$ ) wird die identische Strömungsgeschwindigkeit wie bei Sk 1 vorausgesetzt ( $\bar{u}_S = 0,28 \text{ m/s}$ ). Dagegen wird nunmehr eine Freisetzungsrates gewählt, welche um das Dreifache von Sk 1 erhöht ist ( $\dot{V}_Q = 36 \text{ l/min}$ ), um Leckagen, wie sie in kontinuierlicher Form eher bei Lkws und Tanklastzügen vorstellbar sind, abzubilden.

## 3.6 Untersuchungen im hindernisfreien Modellgebiet

Die folgenden Ausführungen dienen zunächst dazu, ein erstes, grobes Bild von der allgemeinen Ausbreitung des Propans unter den Restriktionen des Kleinversuchsstandes zu zeichnen und dieses mit den aus der Literatur bekannten Charakteristiken einer Schwergasausbreitung abzugleichen.

### 3.6.1 Bodenkonzentrationen bei Standardkombinationen

In Abbildung 3-14 sind die Konzentrationsmittelwerte an den jeweiligen Messpositionen aus zwölf Versuchen, die an unterschiedlichen Versuchstagen in der Kombination Sk 1 durchgeführt wurden, dargestellt. Die linke Darstellung zeigt das longitudinale Konzentrationsprofil entlang des Modelttunnels, wonach ersichtlich die Konzentration mit Quellentfernung abnimmt.

In halblogarithmischer Darstellung verlaufen die vorliegenden Werte analog der Erkenntnisse aus [104] annähernd entlang einer Geraden.

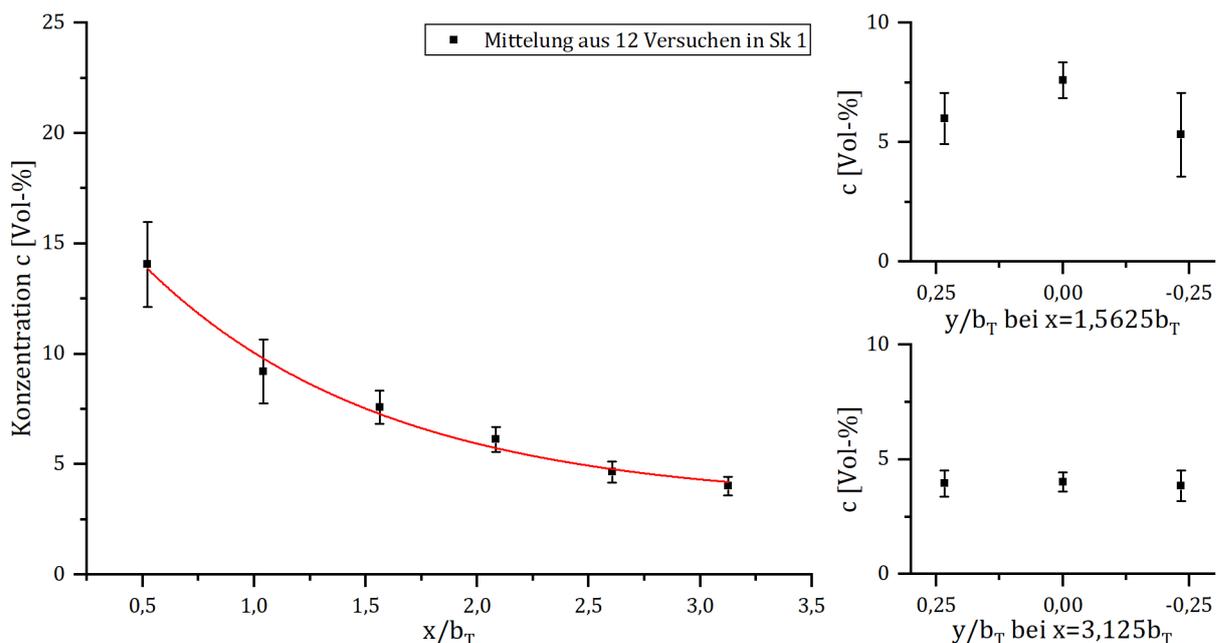


Abbildung 3-14: Aus 12 Einzelversuchen in Sk 1 gemittelte Konzentrationen: links = longitudinales Konzentrationsprofil entlang der Tunnelängsachse mit Regressionskurve; rechts oben = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung  $1,5625b_T$ ; rechts unten = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung  $3,125b_T$

Hinweise zur lateralen Ausbreitung der Wolke liefern die Werte an den außermittig positionierten Sensoren. Bei der Entfernung  $x = 1,5625b_T$  ist die Konzentration an jenen Stellen niedriger als in der Mitte (Abbildung 3-14 rechts oben), so wie es gemäß der bekannten Phänomenologie der Ausbreitung schwerer Gase erwartet werden konnte (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Bei einer Entfernung von  $x = 3,125b_T$  sind die Unterschiede zwischen den drei benachbarten Konzentrationen dagegen nur noch marginal (Abbildung 3-14 rechts unten). Die entgegen der üblichen lateralen

Konzentrationsverteilung an dieser Stelle somit annähernd homogene Wolkenzusammensetzung könnte sich als Resultat der Interaktion der Wolke mit den Tunnelwänden (Totalreflexion) einstellen. Dies setzte voraus, dass die Wolke bis zu jener longitudinalen Entfernung lateral beiderseits die Tunnelwand bereits erreicht habe und sich weiter stromab folglich höchstens noch zweidimensional ausbreiten könnte.

Bis auf einen Einzelversuch wurden bei Entfernung  $1,5625b_T$  im Mittel am linken Messpunkt stets geringfügig höhere Konzentrationen als rechts gemessen. Mit Überprüfung der Quelle bezüglich der mittigen Positionierung sowie der waagerechten Ausrichtung des Fahrbahnbodens wurde versucht, dieses unerwartete asymmetrische Verhalten auf eine möglichst naheliegende Ursache zurückzuführen. Jedoch ließ sich die Asymmetrie selbst nach mehrfacher exakter Neuausrichtung beider Parameter nicht beseitigen. Ursächlich müssen demzufolge andere Faktoren sein, deren Bestimmung im Rahmen der Arbeit jedoch nicht weiterverfolgt wurde. Beispielsweise kann die Beobachtung ebenso das Resultat einer über den Umfang nicht gleichmäßig durchlässigen Fritte sein oder auf einen etwaigen, der Strömungsmessung verborgen gebliebenen Drall der Hauptströmung zurückgehen.

Hinsichtlich der Gefährdungsbeurteilung wird deutlich, dass bei der Mindestlüftungsgeschwindigkeit eine vergleichsweise moderate Freisetzungsrates wie der in Sk 1 an allen Messpositionen zu Propankonzentrationen dauerhaft oberhalb der UEG führt – es stromab der Quelle ein flächenmäßig ausgedehnter Bereich besteht, in dem eine Explosionsgefahr herrscht. Der Versuchsaufbau lässt es in diesem Fall aber nicht zu, aus den Versuchsergebnissen unmittelbar die UZD zu entnehmen. In Fällen wie diesen besteht aber grundsätzlich die Möglichkeit, die UZD auf theoretischem Wege aus der Extrapolation auf den Wert der UEG entlang der oben abgeleiteten Regressionskurve abzuschätzen.

Abbildung 3-15 gibt analog zu Abbildung 3-14 die mittleren Konzentrationen für sechs Versuche in der Sk 2 wieder. Dabei nehmen die Konzentrationen longitudinal qualitativ einen ähnlichen fallenden Verlauf wie bei Sk 1.

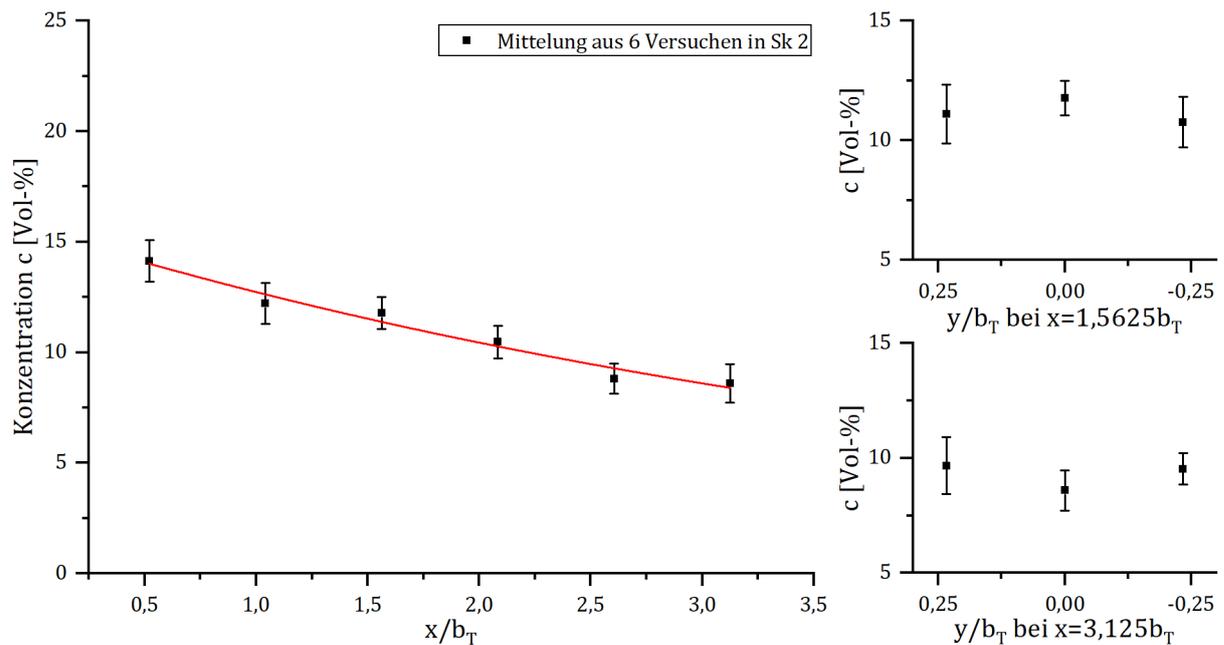


Abbildung 3-15: Aus 6 Einzelversuchen in Sk 2 gemittelte Konzentrationen: links = longitudinales Konzentrationsprofil entlang der Tunnelängsachse mit Regressionskurve; rechts oben = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung  $1,5625b_T$ ; rechts unten = laterales Konzentrationsprofil in Entfernung  $3,125b_T$

Beachtlich hierbei ist, dass trotz merklich gesteigerter Freisetzungsrates die Konzentration am quellnächsten Messpunkt nicht höher als bei Sk 1 ist. Es ist anzunehmen, dass hierbei, wie bei Jets, der nunmehr stärkere Quellimpuls ausschlaggebend ist. Die damit einhergehende verstärkte Turbulenz bzw. initiale Lufteinmischung wirkt einem der Freisetzungsrates proportionalen Konzentrationsanstieg entgegen. Vom ähnlichen Anfangsniveau aus fällt die Konzentration dann mit weiterer Entfernung von der Quelle im Unterschied zu Sk 1 jedoch merklich langsamer ab, so dass am entferntesten Messpunkt schließlich eine etwa doppelt so hohe Konzentration wie bei Sk 1 herrscht. Bei Extrapolation auf die UEG ergibt sich hieraus sodann eine wesentlich größere UZD (siehe Abschnitt 3.9.1), die mit einer deutlich gesteigerten Gefahr einhergeht.

Betrachtet man wiederum die Konzentrationen an den seitlich angeordneten Messstellen, so weichen diese nun in beiden Entfernungen, also auch bereits in einer Entfernung von  $1,5625b_T$ , nur in vergleichsweise geringem Maße von denen in der Mitte ab. Anders gesagt, stellt sich eine homogene Verteilung der Konzentrationen quer zur Hauptrichtung schon quellnäher ein, was auf eine nunmehr stärkere Tendenz zur lateralen Ausbreitung hinweist. Dies steht im Einklang mit den Überlegungen von *Britter & McQuaid* [32], wonach eine Verschiebung des Kräfteverhältnisses von Trägheits- zu Schwerkraften zugunsten von letzterem zu einer kreisförmigeren Ausbreitung führt (vgl. Abschnitt 2.2.1).

### **3.6.2 Versuchsstreuung der mittleren Konzentrationen bei Standardkombinationen**

Trotz der kontinuierlichen Freisetzung und der zeitgemittelten Auswertung ergab sich in der Versuchspraxis eine versuchsübergreifende Streuung der mittleren Konzentrationen. Um an späterer Stelle die Signifikanz von Parameteränderungen anhand der Ergebnisvarianz bemessen zu können, ist die allgemeine Versuchsstreuung zu bestimmen.

Zu diesem Zweck ist in den oberen Abbildungen 3-14 und 3-15 für jeden Messwert zusätzlich die Standardabweichung als Maß der Streuung in Form von Fehlerbalken mit aufgetragen worden. Bei Sk 1 nimmt die Streuung demnach mit Entfernung von der Quelle zunächst stark, dann nur noch geringfügig ab. Quellnah streut die mittlere Konzentration in einem besonders weiten Bereich um  $\pm 2$  Vol-%. Diese reduziert sich deutlich bis auf  $\pm 0,4$  Vol-% am quellfernten Messpunkt. Dieser Befund fügt sich in das auf Grundlage der lateralen Konzentrationsprofile gezeichnete Bild vom quellnahen Ausbreitungsverhalten ein. Eine größere Streuung sollte demnach in Bereichen bestehen, in denen der kompakte, sich allmählich verbreiternde Strahl die Tunnelwände noch nicht erreicht hat und die Wolke damit noch über eine gewisse Variabilität quer zu ihrer Hauptausbreitungsrichtung verfügt. Mit Einnehmen der gesamten Tunnelbreite geht diese Variabilität indes verloren und der Streubereich verkleinert sich. Parametereinstellungen, bei denen sich die Wolke bereits frühzeitig über die gesamte Tunnelbreite erstreckt, sollten demnach bereits quellnah eine geringere und im Weiteren weitgehend gleichbleibende Streuung aufweisen. Dies ist im Falle von Sk 2 zu beobachten, wonach der Mittelwert entfernungsunabhängig zwischen  $\pm 0,6$  Vol-% und  $\pm 1$  Vol-% streut.

### **3.6.3 Sensitivität der Konzentration infolge vom Sollwert abweichender Betriebsparameter**

Die allgemeine Versuchsstreuung kann einerseits das Ergebnis eines zu klein gewählten Mittelungszeitraums sein. Auch wenn für eine abschließende Bewertung die Konvergenzprüfung des Mittelwerts genau genommen für alle Parameterkombinationen vorzunehmen wäre, legt das exemplarisch in Abbildung 3-13 dargestellte Konvergenzverhalten nahe, dass dies als Ursache in erster Annahme auszuschließen ist. Als wahrscheinlicher werden hingegen geringfügige Abweichungen vom Sollwert der beiden vom Bedienpersonal einzuregelnden Betriebsparameter Freisetzungsrates und Strömungsgeschwindigkeit während der Versuchsdurchführung angesehen, die sich aus der Betriebsweise des Versuchstandes ergeben können. Um im Späteren die Signifikanz von Einflüssen bewerten zu können, ist die Ergebnisvarianz, die sich aus einer Abweichung vom Sollwert ergibt, im Vorfeld zu quantifizieren.

In den Diagrammen in Abbildung 3-16 und 3-17 sind die longitudinalen Konzentrationsprofile für die Versuche bei Sollwert sowie bei der gewählten positiven wie negativen Abweichung von diesem aufgetragen. In Anbetracht des am Schwebekörperdurchflussmesser nur optisch überprüf-  
baren Volumenstroms wird angenommen, dass ein möglicher Einstellfehler – unabhängig ob durch eine bereits am Anfang fehlerhafte Eingabe oder eine Drift während des Versuches bedingt – von  $\pm 2$  l/min ( $\Delta \dot{m}_Q = \pm 47,1 / \lambda_{\dot{m}} \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$ ) während des Versuchsgeschehens unbemerkt bleibt. Dies entspricht bei Sk 1 einer relativen Abweichung von 17 % vom Sollwert (bzw. 6 % bei Sk 2). Weicht die Freisetzungsrate um diese Größenordnung vom Soll ab, ergibt sich bei geringerer Freisetzungsrate (Sk1) laut Tabelle 3-1 eine maximale Differenz der Konzentrationen von etwa 2 Vol-%. Die maximale Differenz bei erhöhter Freisetzungsrate (Sk 2) ist dagegen weniger als halb so groß.

Tabelle 3-1: Differenz der Propankonzentration in Vol-% zwischen Versuchen bei Fehljustage zu Konzentration bei Sollwert der Betriebsparameter Volumenstrom bzw. Strömungsgeschwindigkeit an axialen Messpositionen

		QIR110	QIR210	QIR310	QIR410	QIR510	QIR610
Freisetzungsrate	Sk 1 +2 l/min	0,10	1,46	0,49	0,49	0,34	0,43
	Sk 1 -2 l/min	-0,47	-1,03	<b>-2,07</b>	-1,42	-1,12	-0,86
	Sk 2 +2 l/min	0,38	-0,35	-0,18	-0,10	-0,04	-0,18
	Sk 2 -2 l/min	0,72	0,10	-0,16	-0,12	-0,33	-0,39
Strömungsgeschwindigkeit	Sk 1 +0,04 m/s	0,65	-0,31	-0,97	<b>-1,63</b>	-1,27	-1,29
	Sk 1 -0,04 m/s	-0,36	1,12	0,31	0,37	0,88	0,39
	Sk 2 +0,04 m/s	0,47	-0,94	-1,24	-0,46	-0,46	-0,74
	Sk 2 -0,04 m/s	0,29	0,72	0,59	0,45	0,22	0,71

Für die Strömungsgeschwindigkeit wird demgegenüber eine im Zweifel unerkannt bleibende Fehljustage mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 0,04$  m/s ( $\Delta \bar{u}_S = \pm 0,139 / \lambda_{U \frac{m}{s}}$ ) vom Sollwert (rel. Abweichung von ca. 15 % bei  $U_{cCT} = 1 / \lambda_{U \frac{m}{s}}$ ) angenommen. Die Folge ist eine maximale Differenz der Konzentration von circa 1,6 Vol-%. Für Sk 2 ist die maximale Differenz wiederum etwas geringer.

Im Ergebnis gilt festzuhalten, dass für die gewählten Bereiche die Konzentrationen etwa in gleichem Maße auf Änderungen der Freisetzungsrate wie der Strömungsgeschwindigkeit reagieren. Änderungen der Konzentration von kleiner 2 Vol-% werden im Weiteren schließlich als zufällig erachtet.

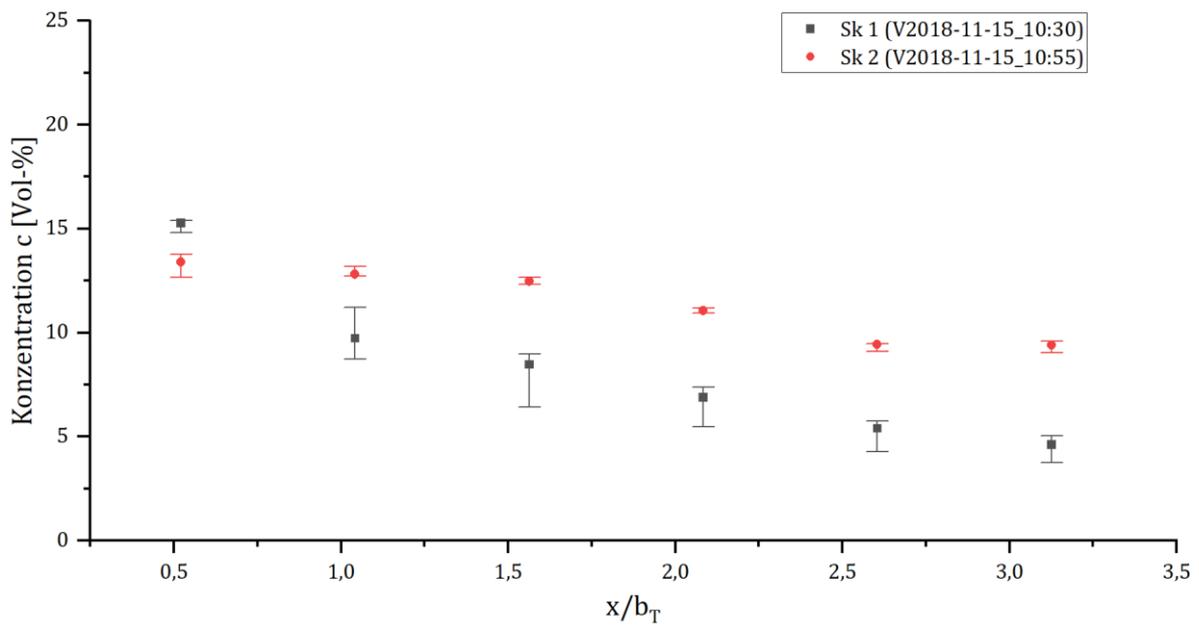


Abbildung 3-16: Longitudinale Konzentrationsprofile bei Abweichung des Volumenstroms um  $\pm 2$  l/min vom Sollwert am Beispiel von Sk 1 und 2; Abweichung als Fehlerbalken dargestellt

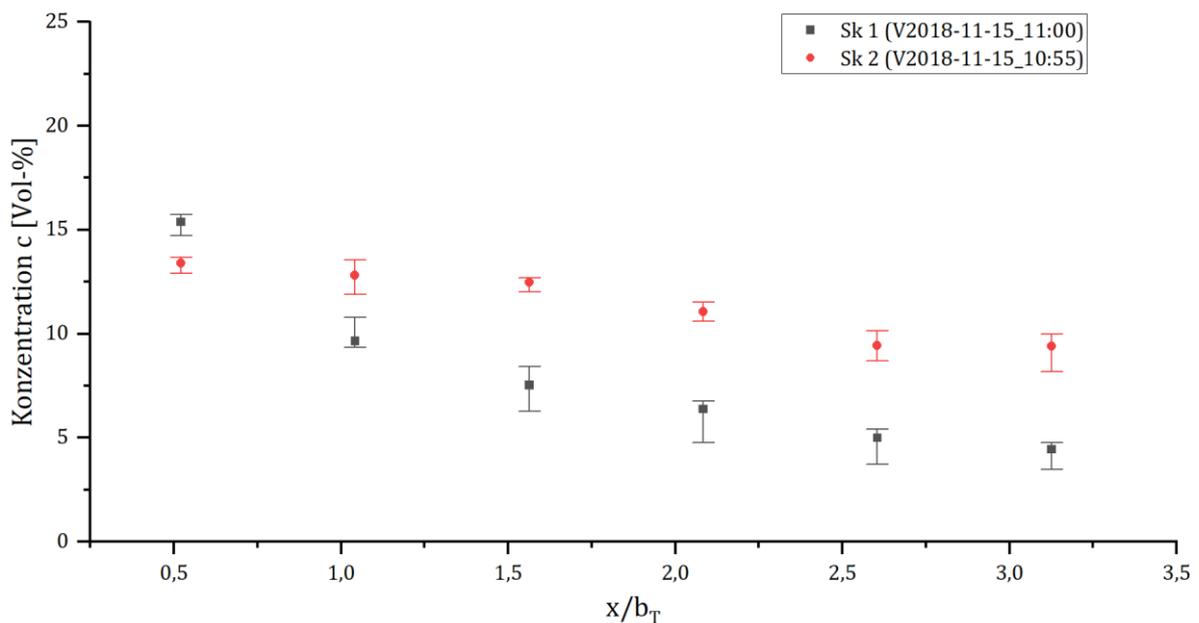


Abbildung 3-17: Longitudinale Konzentrationsprofile bei Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit um  $\pm 0,04$  m/s vom Sollwert am Beispiel von Sk 1 und 2; Abweichung als Fehlerbalken dargestellt

### 3.6.4 Konzentration in erhöhter Messposition

Wie sich bereits gezeigt hat, nimmt die Wolke stromab der Quelle je nach Parametereinstellung früher oder später die gesamte Modelltunnelbreite ein, wobei über eine große Fläche am Boden Konzentrationen oberhalb der UEG vorliegen. Um einen Gesamteindruck von der räumlichen Erscheinung der Wolke zu erlangen, wurde im Folgenden mit einer punktuellen Sensorüberhöhung untersucht, inwieweit sich die Wolke zugleich in die verbleibende, vertikale Richtung erstreckt.

Dazu wurden über die Messpunkte in Entfernung  $x_{QIR110} = 0,52b_T$  sowie  $x_{QIR510} = 2,6b_T$  Röhren definierter Länge gestülpt, so dass die Absaugung nicht mehr bodennah, sondern in einer Höhe von  $z = 0,0625b_T$  über dem Boden erfolgte. Die dabei in jener Höhe festgestellten Konzentrationen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2: Propankonzentration an erhöhter Messposition in Entfernung  $x_{QIR110} = 0,52b_T$  sowie  $x_{QIR510} = 2,6b_T$  für Sk 1 und 2

		QIR110	QIR510
Sk 1	Konzentration an $z = 0,0625b_T$ , V2018-11-08_11:39	0,36 Vol-%	0,65 Vol-%
	Prozent der Konzentration am Boden	3 %	14 %
Sk 2	Konzentration an $z = 0,0625b_T$ , V2018-11-08_11:42	0,45 Vol-%	3,21 Vol-%
	Prozent der Konzentration am Boden	3 %	37 %

In Quellnähe besteht demnach ein großer Konzentrationsgradient in vertikaler Richtung. Die Propankonzentrationen haben sich dabei jeweils um 97 % auf Werte von kleiner 1 Vol-% reduziert. Am quellferneren Messpunkt werden höhere Konzentrationen als in Quellnähe gemessen, welches den Nachweis für einen vertikalen Transport während der Lauflänge zwischen beiden Entfernungen liefert. Für Sk 2 liegen diese Werte zudem weiterhin oberhalb der UEG. Jedoch auch in diesem Fall ist die Konzentration um etwa 2/3 im Vergleich zum Boden reduziert.

Die Wolke weist damit im detektierten Bereich nur eine sehr geringe vertikale Mächtigkeit auf. Es bestätigt sich somit das Wesen des Schwergases, welches infolge der ausgeprägten gravitationsgetriebenen Bewegung eine starke Tendenz zeigt, sich anfänglich beinahe ausnahmslos ebenerdig, ähnlich einer Flüssigkeit, auszubreiten. Die Gefahr einer Entzündung ist folglich gleichsam in unmittelbarer Bodennähe am größten.

### 3.7 Untersuchungen bei Parametervariation

Die vorherigen Untersuchungen ergaben ein ausgeprägtes Schwergasverhalten des freigesetzten Propans im Modelltunnel. Im Folgenden werden nun systematisch Parameter variiert mit dem Ziel, deren Einflussnahme insbesondere auf die Wolkenzusammensetzung zu identifizieren.

#### 3.7.1 Einfluss der Betriebsparameter

Die bei Blick auf die Abbildungen 3-14 und 3-15 ersichtlich höheren Propankonzentrationen für Sk 2 an den meisten der Messpunkte als für Sk 1 liefern bereits einen Hinweis darauf, dass die Freisetzungsraten einen wesentlichen Einfluss auf den Konzentrationsverlauf im Modelltunnel nimmt. Mit dem Ziel den Einfluss im Detail zu untersuchen, wurde eine große Bandbreite von Freisetzungsraten bei differierenden Strömungsgeschwindigkeiten im Modelltunnel realisiert.

Aus Gründen der Anschaulichkeit werden beide Betriebsparameter im Folgenden zunächst einzeln für sich betrachtet, womit vorerst außeracht gelassen wird, dass den Ähnlichkeitsbetrachtungen nach beide Parameter über die densimetrische Froudezahl verknüpft sind. In Abschnitt 3.9.2 wird dann der Versuch einer Vereinheitlichung und kompakteren Darstellung in dimensionsloser Form unternommen.

In Abbildung 3-18 ist exemplarisch die Schar von Konzentrationsverläufen unterschiedlicher Quellmassenströme bei einheitlicher Strömungsgeschwindigkeit von  $U_{ccT} = 1/\lambda_U \frac{m}{s}$  (entspricht der Mindestgeschwindigkeit nach RABT) dargestellt.

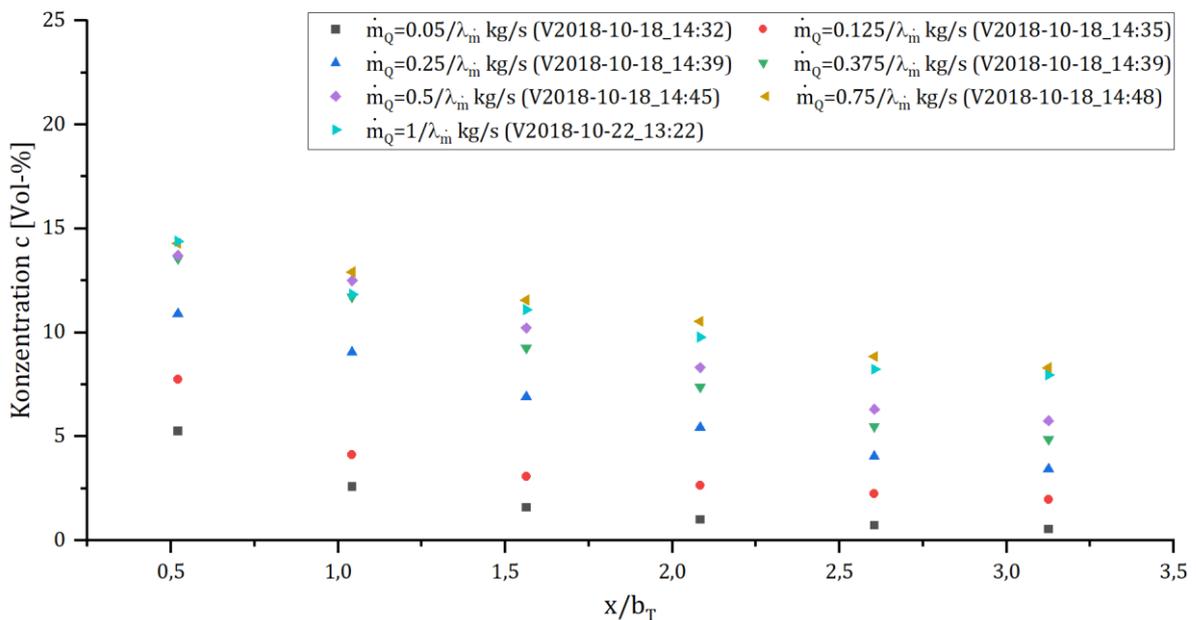


Abbildung 3-18: Longitudinale Konzentrationsverläufe für Kurvenschar unterschiedlicher Quellmassenströme bei Mindestgeschwindigkeit nach RABT

Alle Kurven bilden die oben beschriebene Verdünnungscharakteristik nach, wobei sich quantitativ deutliche Unterschiede ergeben. Quellnah liegen die Konzentrationen durchgängig höher als quellfern. Augenscheinlich gilt: Je größer die Freisetzungsrate ist, desto höher liegt auch das Konzentrationsniveau, was zwangsläufig ein Anwachsen der UZD zur Folge hat.

Zwar nehmen die Konzentrationen mit Entfernung von der Quelle allesamt ab, bei genauerer Betrachtung fällt aber auf, dass die longitudinale Verdünnung unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Besonders deutlich tritt dies im Fall halber Mindestgeschwindigkeit hervor (Abbildung 3-19). In Abbildung 3-19 wurde hierzu eine Darstellung gewählt, bei der die entfernungsbezogenen Konzentrationen am Beispiel aller axial mittigen Messpunkte nunmehr über die Freisetzungsrate aufgetragen sind.

Wird der Quellmassenstrom vom niedrigsten Wert gesteigert, so steigt die Konzentration quellnah zunächst schneller an als quellfern – die Differenz der Konzentration vom quellnächsten zum

quellentferntesten Messpunkt wird größer. Während der Anstieg der Konzentrationen mit dem Quellmassenstrom für die quellferneren Messpunkte annähernd gleich bleibt bzw. sich nur in geringem Maße verringert, erreicht die Konzentration in Quellnähe schnell ihr augenscheinliches Maximum (etwa bei  $\dot{m}_Q = 0,4/\lambda_m \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  bzw.  $Fr_D = 0,33$ ), welches auch bei weiterer Zunahme des Quellmassenstroms nicht überschritten wird (tendenziell sinkt die Konzentration sogar wieder etwas ab). Eine sich wieder verringernde Differenz der Konzentrationen ist die Folge. Die Verdünnung entlang des Modellgebiets ist bei hohen Quellmassenströmen somit im Vergleich nur noch gering. Ursächlich für dieses Verhalten kann der mit höheren Quellmassenströmen immer beständigere und kompaktere dichte Kern der Schwergaswolke sein. Ebenso könnten die Tunnelwände, welche den lateralen Ausbreitungsbereich begrenzen, zunehmend die Verdünnung über die Seitenflächen einschränken. Am wahrscheinlichsten ist eine Kombination aus beidem.

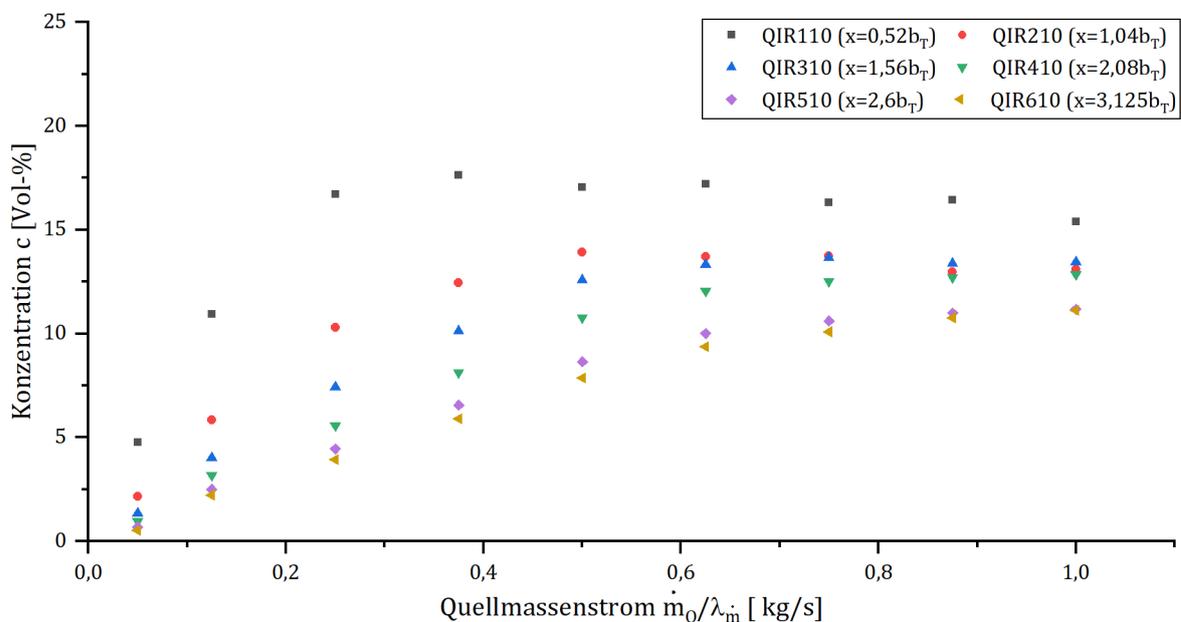


Abbildung 3-19: Konzentration an den axial mittigen Messpunkten (dimensionslose Quellentfernung in Klammern angegeben) bei halber Mindestgeschwindigkeit nach RABT über den Quellmassenstrom aufgetragen

Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit kann anhand der Abbildung 3-20 nachvollzogen werden. Die Darstellung zeigt die Kurvenschar der Konzentrationen bei nunmehr fixierter Freisetzungsrates. Bei schrittweisem Anheben der Geschwindigkeit verschieben sich die Kurven identischen Quellmassenstroms hin zu kleineren Konzentrationen. Zuerst sinken dabei die Konzentrationen quellfern stärker ab als in Quellnähe. Auch die hohe Freisetzungsrates von  $\dot{m}_Q = 1/\lambda_m \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  ergibt dann nur noch eine vergleichsweise kurze UZD. Dies erscheint schlüssig, da ein Anheben der Strömung zu stärkerer Scherung führt und mit einer erhöhten turbulenten Diffusion einhergehen sollte. Bei Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend der kritischen im Brandfall ( $\bar{U}_{cCT} = 3/\lambda_U \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) sowie im Bereich der maximalen Luftförderung ist die Außenströmung so stark, dass die

Konzentrationen nicht nur quelfern konsequent weiter absinken, sondern ebenfalls in Quellnähe. Die UZD wird dabei effektiv reduziert.

Hinsichtlich der Gefahrenabwehr leitet sich hieraus ab, dass das Anheben der Strömungsgeschwindigkeit entlang des Tunnels eine effektive und adäquate Maßnahme zur Reduktion der Konzentrationsmittelwerte darstellt.

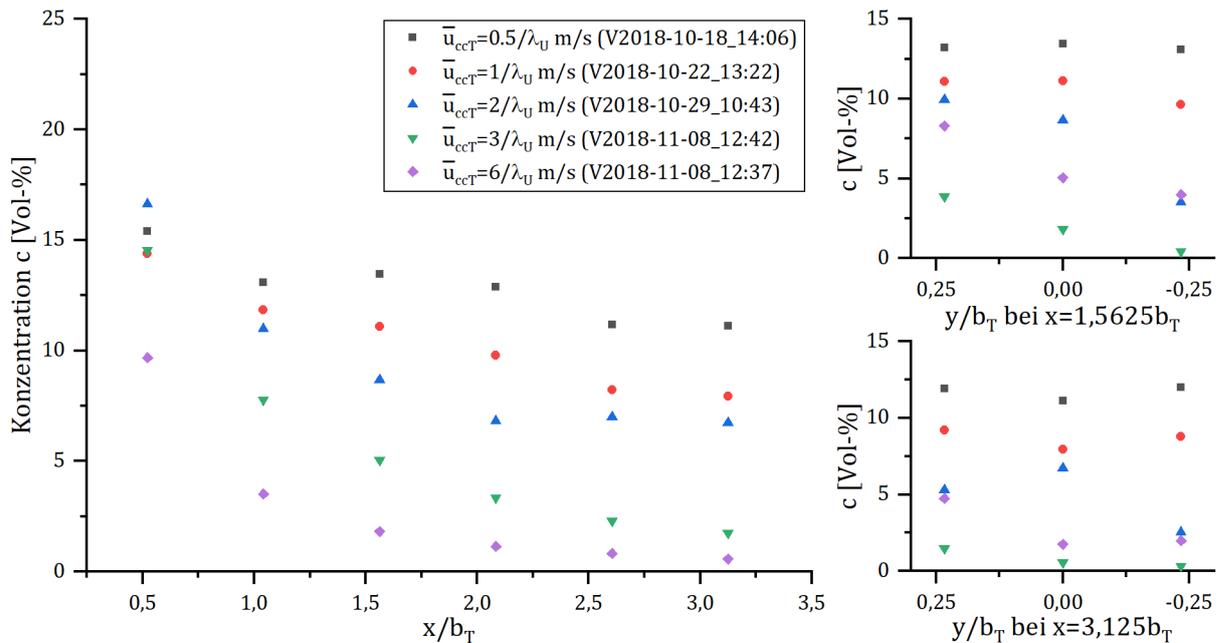


Abbildung 3-20: Longitudinale und laterale Konzentrationsverläufe für Kurvenschar unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten bei  $\dot{m}_Q = 1/\lambda_{\dot{m}} \frac{kg}{s}$

Es deutet sich zudem an, dass eine stärkere Tunnelströmung die Wolke in eine schmale fahnen-ähnliche Ausbreitungsform zwingt, deren Zentrum zudem aus der Mittelachse verschoben sein kann. Anlass hierfür geben die lateralen Konzentrationsverläufe (in Abbildung 3-20 rechts). Während bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten die Konzentrationen an den benachbarten Messpunkten ähnlich sind, so weichen diese bei hoher Strömungsgeschwindigkeit zum einen stärker voneinander ab und zum anderen treten die höchsten Konzentrationen teils außermittig auf.

Wie die Untersuchungen bestätigen, nehmen, wie erwartet, die Parameter Freisetzungsrate und Strömungsgeschwindigkeit einen gegensätzlichen Einfluss auf die Konzentrationswerte im Modelltunnel.

### 3.7.2 Längsneigen des Bodens

*Britter & Snyder* haben für Schwergase festgestellt, dass bei Ausbreitungen entlang von Rampen mit Steigungen von  $14^\circ$  die bodennahen Konzentrationen in Hauptausbreitungsrichtung stromab der Quelle um bis zu 40 % kleiner sind als im waagerechten Fall [33]. *König* stellte bei einer um 8,6 % geneigten Oberfläche und Windstille die flächenmäßig größten Entflammbarkeitsgebiete

aller getesteten Untersuchungsgebiete fest [66]. *Gröbelbauer* untersuchte die Schwergasausbreitung experimentell bei geneigter Ebene im Kanal. Er legte seinen Fokus dabei zwar auf andere Aspekte, weist in seinen Ausführungen aber auf die sich durch die Neigung verändernde Relativgeschwindigkeit an der Deckfläche der Wolke hin, die Einfluss auf die Lufteinmischung hat [50]. Diese Aussagen gaben Anlass zur Untersuchung des Einflusses der Fahrbahnneigung auf die Konzentrationsverteilung im Modelltunnel.

Wenngleich eine detaillierte Untersuchung durch die variable Einstellmöglichkeit der Neigung im Versuchsstand prinzipiell möglich ist, werden exemplarisch die Neigungen  $\alpha_T = \pm 2,5\%$ , und  $\alpha_T = \pm 5\%$  (als maximal in der *RABT* erwähnter Wert) ausgewählt, an denen der Einfluss der Längsneigung beurteilt werden soll. Positive Neigungen entsprechen dabei einem Anstieg in Strömungsrichtung, negative einem Gefälle.

Wie aus den longitudinalen Konzentrationsverläufen in den Abbildungen 3-21 und 3-22 ersichtlich wird, erfahren die Konzentrationen im Vergleich zu den ungeneigten Konfigurationen sowohl für positive als auch negative Neigungen keine wesentlichen Änderungen. Ein signifikanter Einfluss der Längsneigung auf die Verdünnungscharakteristik stromab der Quelle kann damit im von der *RABT* begrenzten Bereich nicht nachgewiesen werden.

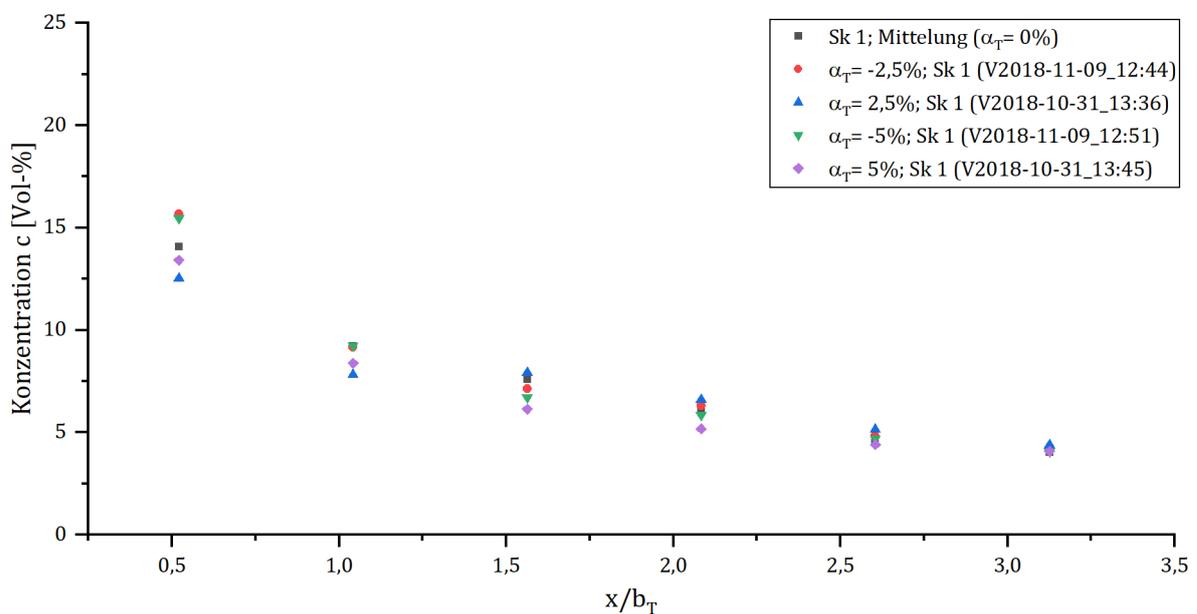


Abbildung 3-21: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei positiver und negativer Längsneigung des Fahrbahnbodens

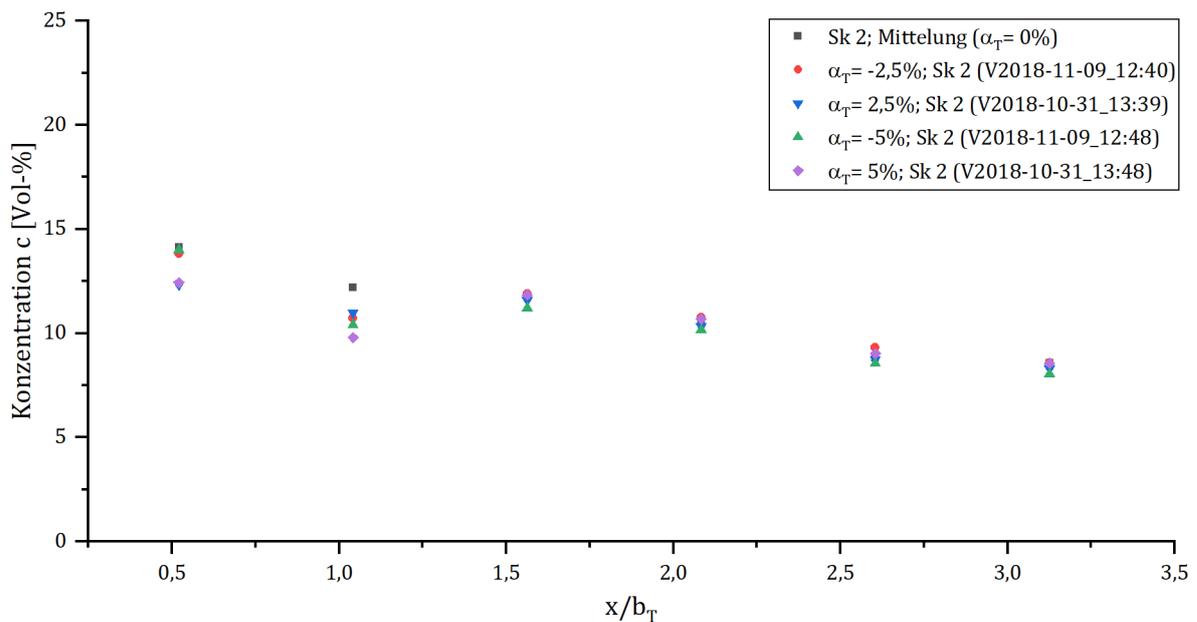


Abbildung 3-22: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei positiver und negativer Längsneigung des Fahrbahnbodens

Dies steht im Gegensatz zu den erwähnten Ergebnissen insbesondere von *Britter & Snyder*. Auch wenn prinzipiell der von den Autoren festgestellte Einfluss ebenso im Modelltunnel erst bei den von ihnen untersuchten größeren Neigungen eintreten könnte, wird als wesentlich für das Ausbleiben eines solchen Verhaltens angesehen, dass mit der seitlichen Begrenzung durch die Tunnelwände der Wolke die Möglichkeit der lateralen Verbreiterung genommen wird.

### 3.7.3 Prüfen des Backlayerings bei Längsneigung

An dieser Stelle soll untersucht werden, inwieweit ein Backlayering ähnliches Verhalten (vgl. Abschnitt 2.4.3) von Propan im Modelltunnel beobachtet werden kann. Dieser Aspekt kann wesentlich Einfluss auf die abschließende Sicherheitsbetrachtung des diskutierten Szenarios nehmen.

Zu diesem Zweck wurden vorübergehend geringfügige Änderungen an der Versuchsanordnung vorgenommen. Es wurde durch die Umpositionierung des Ventilators vom einen zum anderen Rohrende die Strömungsrichtung im Modelltunnel umgekehrt. Analog wurden Gitternetz und Einlaufklappe an dem ehemals saugseitigen Ende angebracht. Als Konsequenz dieses Neuarrangements ließen sich nunmehr die Konzentrationen stromauf der Quelle erfassen. Dass sich hierbei Änderungen der Strömungsverhältnisse an der Quelle ergeben, ist anzunehmen, diese wurden aber aufgrund des spiegelbildlichen Aufbaus als geringfügig eingestuft, so dass auf eine vertiefte Untersuchung analog zu der in Abschnitt 3.4 verzichtet wurde.

Abbildung 3-23 zeigt die bodennahen Konzentrationen auf der Mittellinie für den Bereich stromauf der Quelle für unterschiedliche Parameterkonfigurationen sowie Neigungen der Fahrbahn.

In waagerechter Position traten in der Standardkonfiguration mit höherer Freisetzungsrate (Sk 2) keine Konzentrationen stromauf der Quelle auf. Anschließend wurde die Fahrbahn längsgeneigt. Von Interesse ist aufgrund des vorhandenen Schwerepotentials der Wolke nur eine in Strömungsrichtung positive Neigung. Bei einer Neigung von 2,5 % wird in Sk 2 ausschließlich am quellnächsten Messpunkt Propan detektiert. Die Schwergaswolke wandert in dieser Einstellung demnach bergab bis zu einer Entfernung von der Quelle zwischen  $x_{QIR110} = 0,53b_T$  und  $x_{QIR210} = 1,04b_T$ . Dieser Zustand erwies sich als über die Versuchsdauer stabil. In Sk 1 wird wiederum kein Propan an den Messstellen detektiert.

Wird die Neigung auf 5 % gesteigert, wandert die Wolke weiter stromauf zunächst bis mindestens zu einer Quellentfernung  $x_{QIR310} = 1,5625b_T$  und bei weiterer Änderung der Betriebsparameter dann über den gesamten detektierten Bereich. Die Wirkung der Strömung reicht in diesen Fällen demnach nicht mehr aus, um das „Fließen“ des Schwergases entlang der Ebene zu verhindern. Dabei verdünnt sich die Wolke nach der üblichen Form. Analog der Brandrauchbekämpfung im Tunnel konnte alsdann durch ein Anheben der Strömung über die Mindestlüftungsgeschwindigkeit die stromauf befindliche Wolke erwartbar wieder vollständig zurückgedrängt werden.

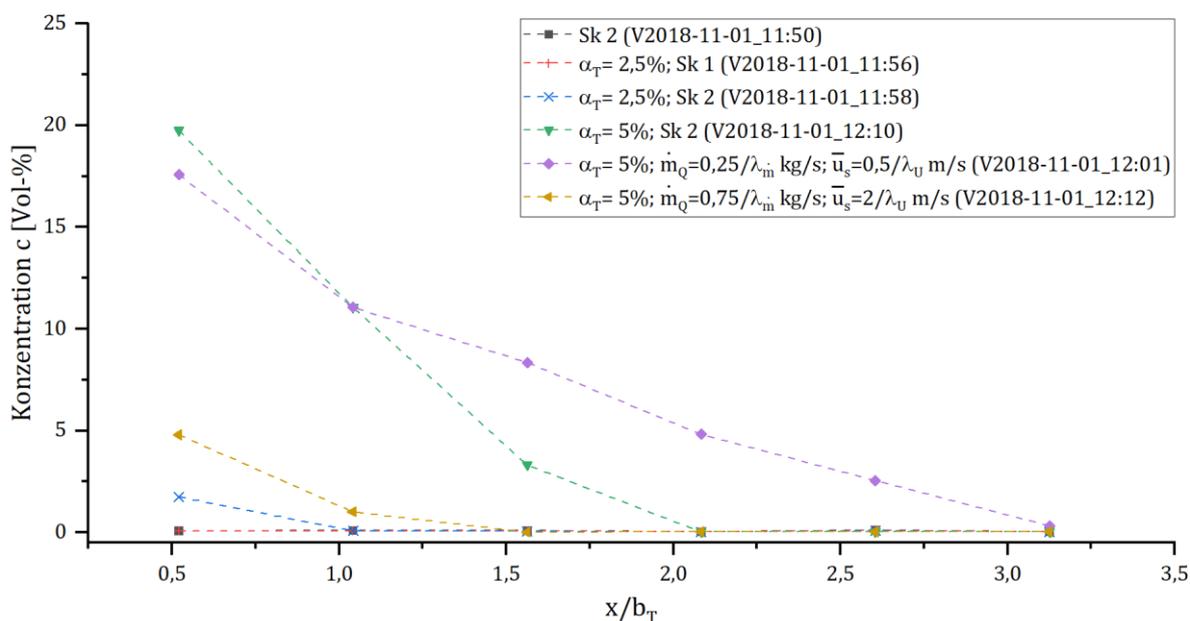


Abbildung 3-23: Longitudinale Konzentrationsverläufe für den Bereich stromauf der Quelle bei Prüfung von backlayeringähnlichem Verhalten für unterschiedliche Parameterkonfigurationen sowie Neigungen der Fahrbahn; bei den Versuchen V2018-11-01\_11:50 und V2018-11-01\_11:56 betragen die Propankonzentrationen an allen Messpunkten  $\leq 0,11$  Vol-%

Mit diesen recht einfachen, stichprobenhaften Untersuchungen ist das Stromaufwandern der Schwergase im Modelltunnel dokumentiert. Das Schwerepotential der Wolke reicht zumindest im Bereich der untersuchten Freisetzungsrate aber erfreulicherweise nicht aus, um bei ungeneigter

Fahrbahn sicherheitsrelevante Entfernungen stromauf der Quelle zu erreichen. Es zeigt sich zudem, dass sich das übliche Hochfahren der Lüftungsanlage auch bei Schwergasen eignet, Backlayering effektiv zu verhindern.

### 3.7.4 Querneigen des Bodens

Bei Querneigung des Bodens sollte sich das Schwergas aufgrund seines Schwerepotentials in Richtung des Gefälles bewegen und entlang der dort befindlichen Tunnelwand ausbreiten. Da asymmetrische Verhältnisse im Tunnel die Folge wären, bestünde prinzipiell die Möglichkeit, dass dies zu höheren Konzentrationen in Quellferne führe. Beide Annahmen gilt es zu prüfen.

Der Fahrbahn im Modeltunnel kann durch Ankippen des Fahrbahnunterbaus eine Querneigung aufgeprägt werden. Es wurde sowohl eine positive (Fahrbahn nach rechts geneigt) als auch negative (Fahrbahn nach links geneigt) Neigung, jeweils in den Stellungen  $2^\circ$  ( $\beta_T = 3,5\%$ ) und  $4^\circ$  ( $\beta_T = 7\%$ ), angelegt.

Ausgangspunkte bilden wiederum die Standardkonfigurationen. Zur Veranschaulichung des lateralen Konzentrationsverlaufs ist in den beiden folgenden Abbildungen zudem die Konzentration in laterale Richtung aufgetragen. Für den Vergleich ist zudem der mittlere Verlauf von Sk 1 bzw. Sk 2 ohne Querneigung aus Abschnitt 3.6.1 in die jeweilige Abbildung mit aufgenommen.

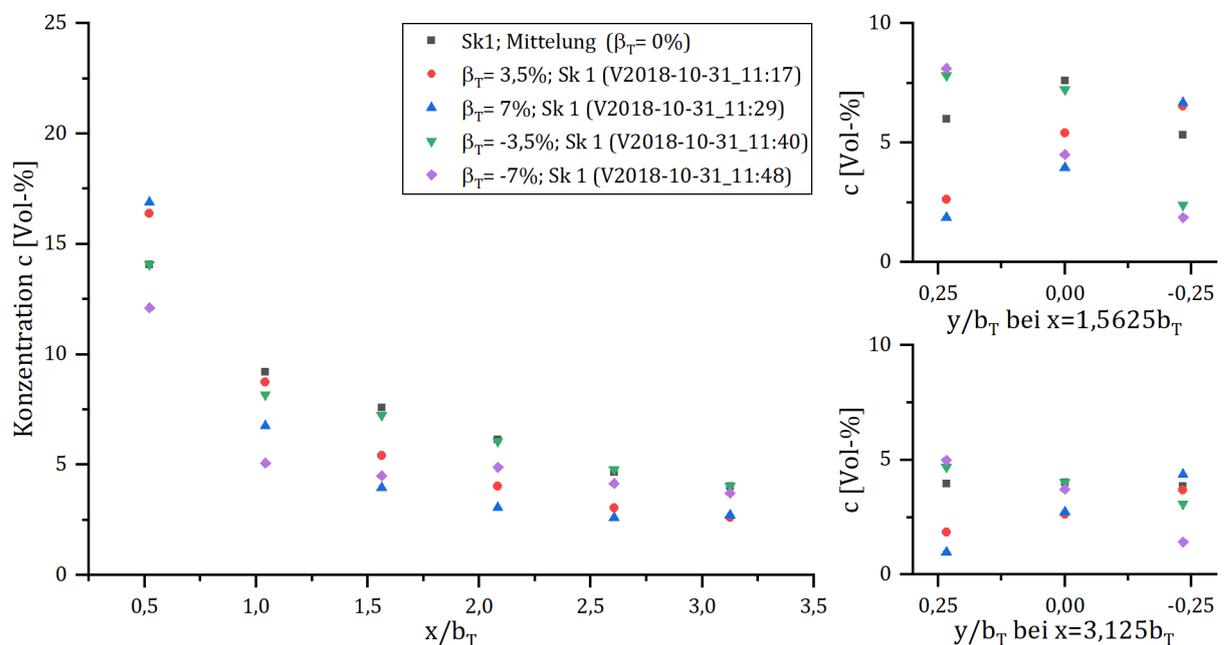


Abbildung 3-24: Longitudinaler und lateraler Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei Querneigen des Bodens

Nach Abbildung 3-24 sind die Konzentrationen jeweils in Richtung der Neigung am höchsten. Je größer die Neigung, desto größer die Differenz zwischen den äußeren Messpunkten. Die beschriebene Linkslastigkeit (vgl. Abschnitt 3.6.1) könnte der Grund sein, dass sich spiegelbildliche Verhältnisse in der Konzentration zwischen linken und rechten Konfigurationen gleicher Neigung

nicht vollständig einstellen. Die lateralen Unterschiede nehmen von der Quellentfernung  $x = 1,5625b_T$  nach  $x = 3,125b_T$  ab. Die Seitenlastigkeit besteht quellenfern aber weiter.

Bei höheren Freisetzungsraten tritt beschriebenes Verhalten ebenfalls auf (Abbildung 3-25); die Konzentrationen an benachbarten Messpunkten unterscheiden sich hingegen aber weniger deutlich, weshalb die Identifikation der Charakteristiken schwerer fällt.

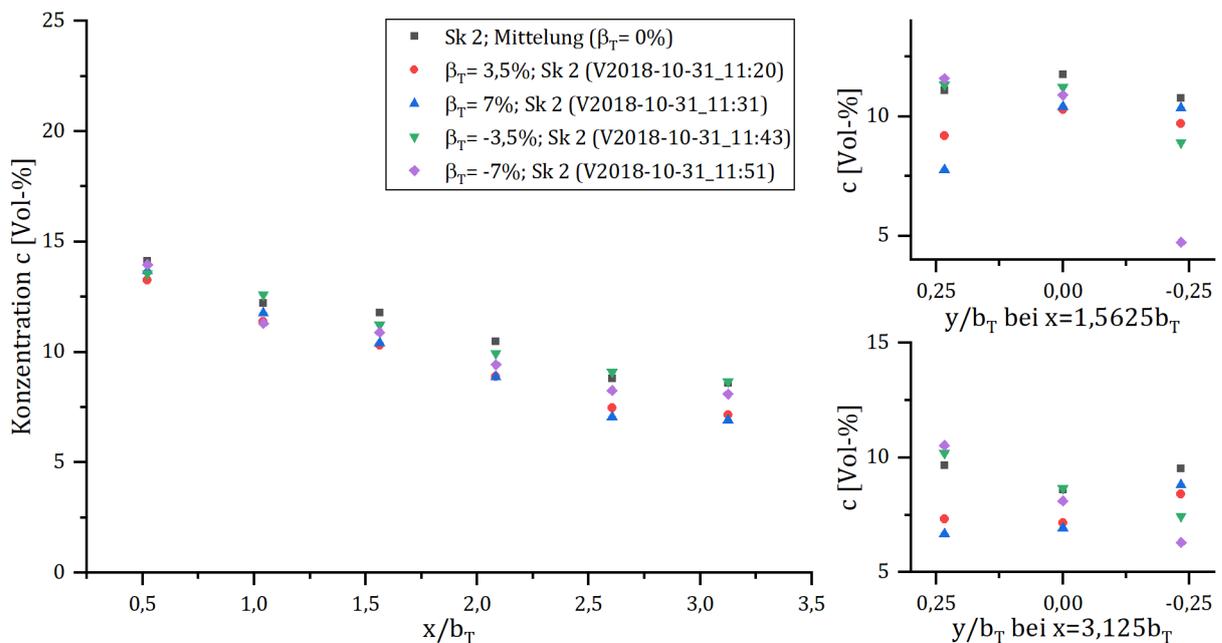


Abbildung 3-25: Longitudinaler und lateraler Konzentrationsverläufe für Sk 2 bei Querneigen des Bodens

Mit Querneigung versetzt sich der Hauptstrom somit seitlich. Orte der höchsten Konzentrationen liegen nun zwar nicht mehr auf der Mittelachse, für die Berechnung der UZD spielt dies jedoch eine untergeordnete Rolle, da die maximale Konzentration in Quellferne etwa der der Standardkonfiguration entspricht. Die UZD unterliegt somit keiner Änderung durch eine quergeneigte Fahrbahnoberfläche.

### 3.7.5 Außermittig positionierte Quelle

Bei unfallbedingten Freisetzungen sollte ebenso die Möglichkeit einer außermittig positionierten Quelle in Betracht gezogen werden. Beispielweise werden sowohl in den CFD-Simulationen von *Muzamal* als auch in dem untersuchten Fallbeispiel der *HSE* außermittige Quellen zugrunde gelegt (vgl. [53, 77]).

In Abbildung 3-26 sind die longitudinalen Konzentrationsverläufe im Modelltunnel bei lateral verschobener Quellposition dargestellt.

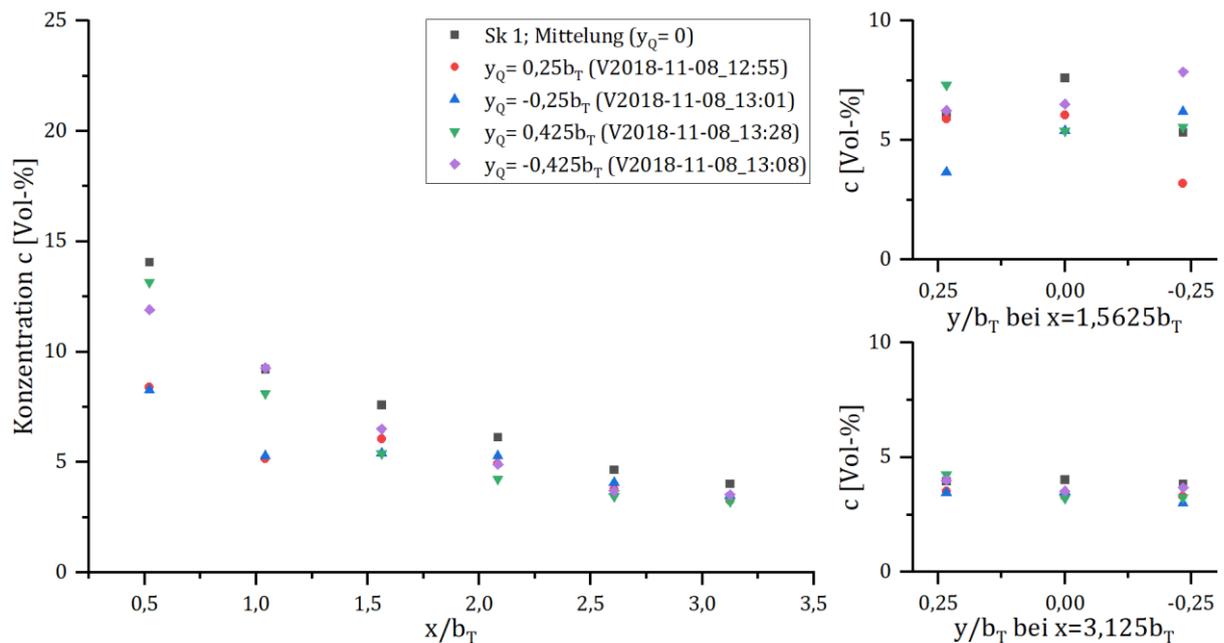


Abbildung 3-26: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei lateral verschobener Quellposition

Insbesondere an den Quellkonfigurationen  $y_Q = 0,25b_T$  sowie  $y_Q = -0,25b_T$  ist die Konzentration an den beiden quellnächsten Messpunkten signifikant geringer als bei mittlerer Anordnung. Bemerkenswert ist, dass die beiden Konfigurationen mit größtmöglichem Abstand der Quelle zur Mitte direkt an den Tunnelwänden dagegen an jenen beiden Messpunkten wieder zu höheren Konzentrationen führen. Erklären ließe sich dieses Verhalten dadurch, dass ein Teil des wandnah abgestrahlten Propans ausgelöst durch Reflexion an der Tunnelwand insbesondere in Verbindung mit kleinen Strömungsgeschwindigkeiten der Luft wieder stärker in die Tunnelmitte transportiert wird.

Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit sollte dieser Effekt demnach infolge der vermehrten Wirkung in axiale Richtung weniger stark ausgeprägt sein. Untersuchungen mit dreifach gesteigerter Strömung bestätigen dies (Abbildung 3-27). Im Gegensatz zu Abbildung 3-26 wird zumindest für den quellnächsten Messpunkt einheitlich beinahe keine Konzentration mehr bei den wandnahen Quellkonfigurationen gemessen.

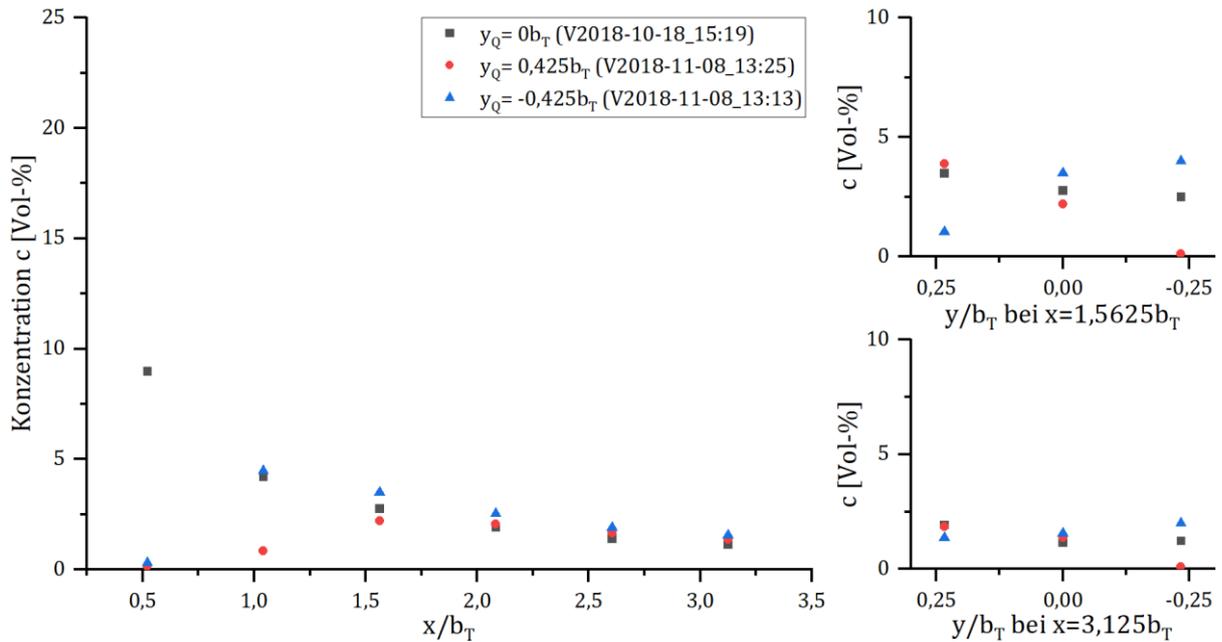


Abbildung 3-27: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für  $\dot{m}_Q = 0,25/\lambda_m \frac{kg}{s}$  und  $U_{cct} = 2/\lambda_U \frac{m}{s}$  bei lateral verschobener Quellposition

Bei den Versuchen mit lateral versetzter Quelle ist überdies davon auszugehen, dass mit der bestehenden Sensoranordnung die Spitzenkonzentrationen quellnah nicht erfasst werden konnten. Quellfern nehmen die lateralen Konzentrationen jedoch wieder den Wert der mittigen Vergleichskurven an. Für die Bemessung der UZD scheint es daher statthaft, alle Quellen vereinfachend als stets mittig anzunehmen.

### 3.7.6 Anheben der Quelle

Das reale Unfallgeschehen kann ebenso einen vom Boden abgehobenen Quellort nach sich ziehen. Freisetzungen von einem Ort, der oberhalb des Personenraumes liegt ( $> 1,8 \text{ m}$ ), werden hingegen als unwahrscheinlich angesehen. *Donat* hat für impulsbehaftete horizontale Schwergasstrahlen in unbebautem Gelände die Quellhöhe als signifikanten Parameter der mittleren Konzentrationen im quellnahen, für die Bestimmung der UZD interessanten Bereich identifiziert (vgl. [40]).

Wie Abbildung 3-28 zu entnehmen ist, ist ebenso im Modelltunnel mit dem Anheben der Quelle vom Boden quellnah ein drastisches Absinken der (bodennahen) Konzentrationen verbunden. Mit weiterer Quellerhöhung setzt sich diese Abnahme stark degressiv fort, bis, so scheint es, mit maximal getesteter Quellhöhe ein Konzentrationsminimum im Bereich der UEG erreicht ist. Unter diesen Bedingungen ist zugleich die longitudinale Verdünnung nur noch gering.

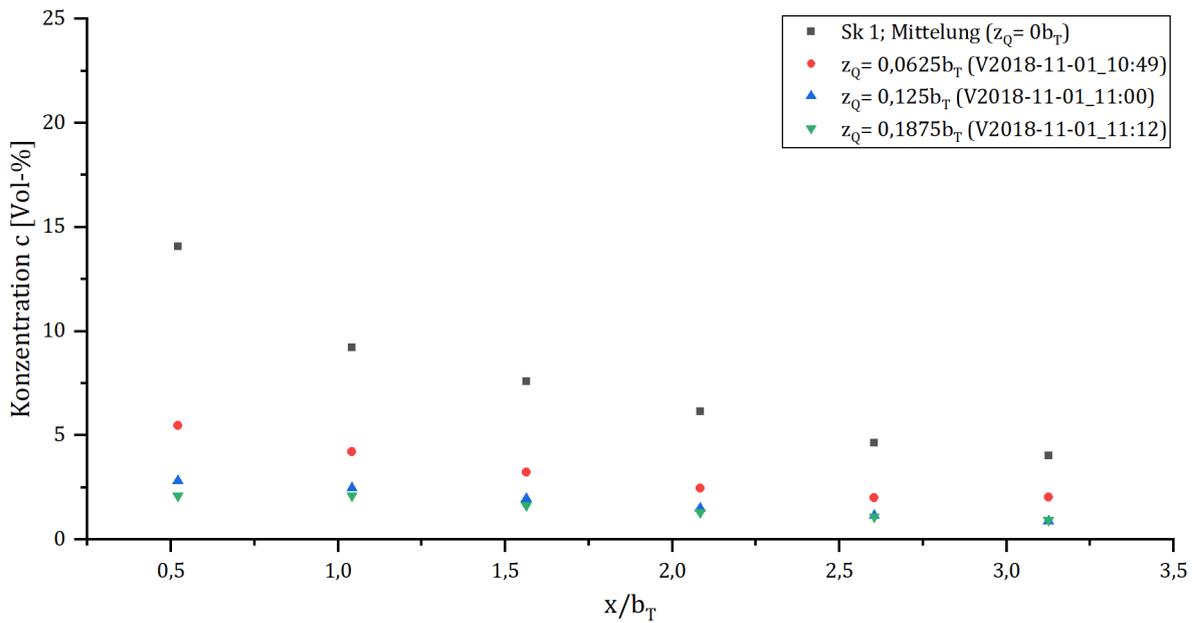


Abbildung 3-28: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei erhöhter Quelle

Diese Ausführungen besitzen ebenso Gültigkeit für große Freisetzungsraten (siehe Abbildung 3-29). Interessant ist in diesem Zusammenhang nunmehr der Vergleich beider Abbildungen, der darauf weist, dass bei vom Boden abgehobenen Quellen trotz dreifach gesteigerter Freisetzungsrates die Absolutwerte der Konzentrationen für identische Quellhöhen nur noch geringfügig voneinander differieren. Bei vom Boden abgehobener Quelle steigen die Konzentrationen am Boden mit der Freisetzungsrates also nicht mehr im selben Maße wie bei bodennahen Quellen.

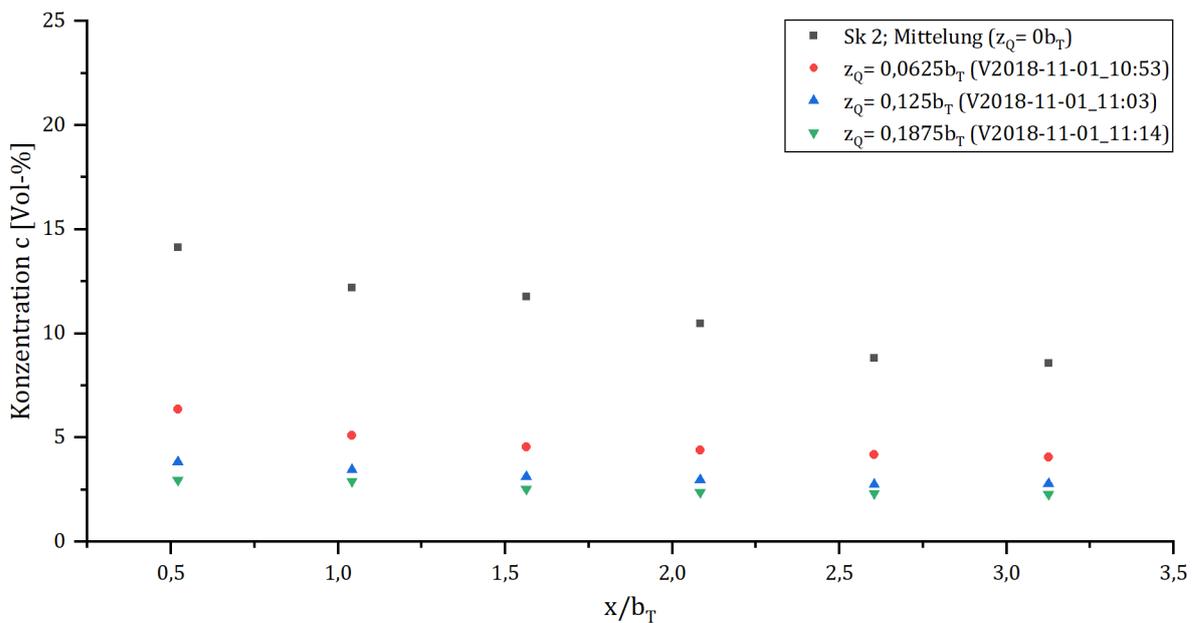


Abbildung 3-29: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei erhöhter Quelle

Ein Anheben der Strömungsgeschwindigkeit führt dagegen erwartungsgemäß wieder zu sinkenden Konzentrationen (siehe Abbildung 3-30). Unter diesen Bedingungen lässt der Verlauf der

Konzentrationen zudem das erste Mal einen *Aufpunkt* erkennen – bodennah der Ort der höchsten Konzentrationen, der nicht mit dem quellnächsten zusammenfällt. Wie in [40] beschrieben, bildet sich ein quellentfernter Auf(-treff)punkt heraus, wenn im Verhältnis zum Schwerepotential der Wolke die Trägheitskraft überwiegt, so dass die Wolke zusehends mit der Strömung mitgetragen wird und der Hauptstrahl mit den höchsten Konzentrationen erst in weiterer Quellentfernung auf den Boden trifft. Darüber hinaus lässt sich der Abbildung entnehmen, dass die Entfernung des Aufpunktes zur Quelle von der Quellhöhe abhängt, was ebenso im Einklang mit *Donats* Beobachtungen steht.

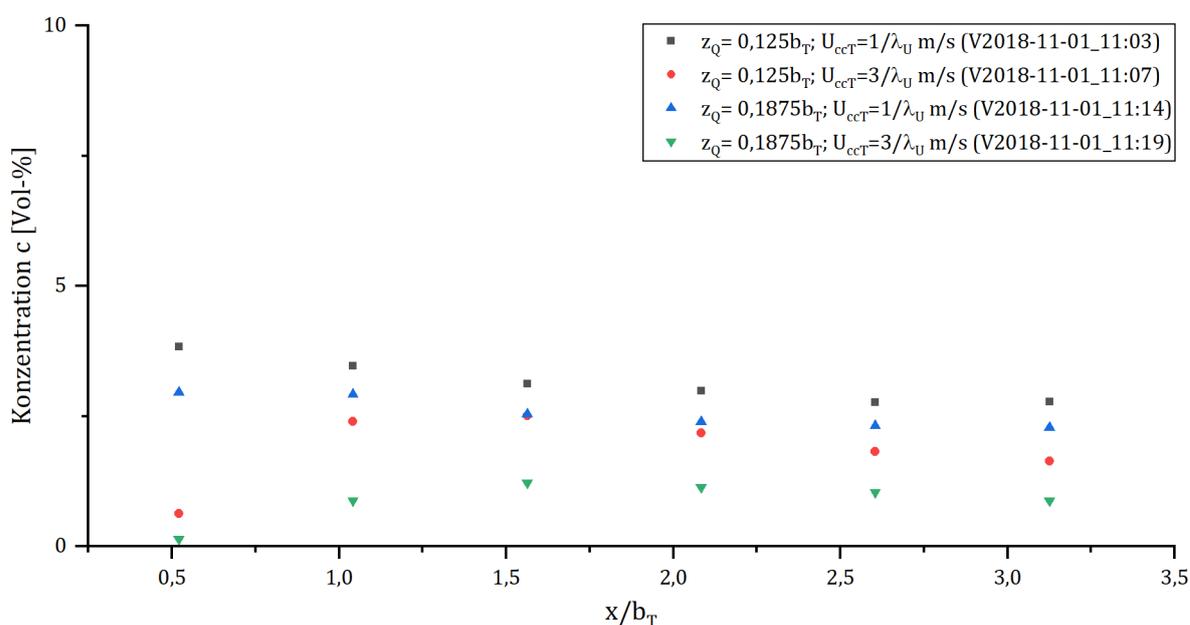


Abbildung 3-30: Vergleich des longitudinalen Konzentrationsverlaufs bei erhöhter Quelle und Anheben der Strömung von Sk 2 auf  $U_{ccT} = 3/\lambda_U \frac{m}{s}$

Insgesamt leitet sich daraus ab, dass *Donats* Befund von der verdünnungsfördernden Wirkung der Quellhöhe gleichzeitig Gültigkeit für die Ausbreitung im Modelltunnel besitzt. Sicherlich spielt bei dieser Art der Einflussnahme eine Rolle, dass der Strömung durch Anheben der Quelle eine größere „Angriffsfläche“ zur Verfügung steht. Es gilt in diesem Zusammenhang aber ebenso zu beachten, dass aus phänomenologischer Sicht die Freisetzung in einem solchen Fall nicht mehr innerhalb der Bodengrenzschicht (Dicke in der Größenordnung von mm) erfolgt, was zu grundsätzlich anderen Randbedingungen der Verdünnung um die Quelle führen dürfte.

Aus sicherheitstechnischer Sicht ist eine erhöhte Quelle allein aber noch kein Garant für eine Entschärfung der Gefahrensituation, sondern nur in Verbindung mit einem Anheben der Strömungsgeschwindigkeit wird die Wolke effektiv (in diesem Fall unter die UEG) verdünnt.

## 3.8 Untersuchungen bei Anwesenheit von Hindernissen

Bis hierhin wurde in den Untersuchungen ein hindernisfreies Tunnelinneres unterstellt. Bei unfallbedingten Freisetzungen ist es aber nahezu unvermeidlich, dass sich zumindest das leckgeschlagene Fahrzeug als Hindernis im Freisetzungsgebiet befindet. Neben diesem kann mit hoher Wahrscheinlichkeit von weiteren involvierten Fahrzeugen ausgegangen werden. Im Folgenden wird zunächst die Anwesenheit eines einzelnen Hindernisses angenommen, bevor eine Ansammlung mehrerer Hindernisse in Betracht gezogen wird.

### 3.8.1 Positionierung eines Würfelhindernisses stromauf der Quelle

Fahrzeuge wurden in den Untersuchungen vereinfacht durch generische Kuben mit einer Kantenlänge  $a_{iH} = 0,2b_T$  (bzw. Quader bei Mehrfachhindernissen) abstrahiert.

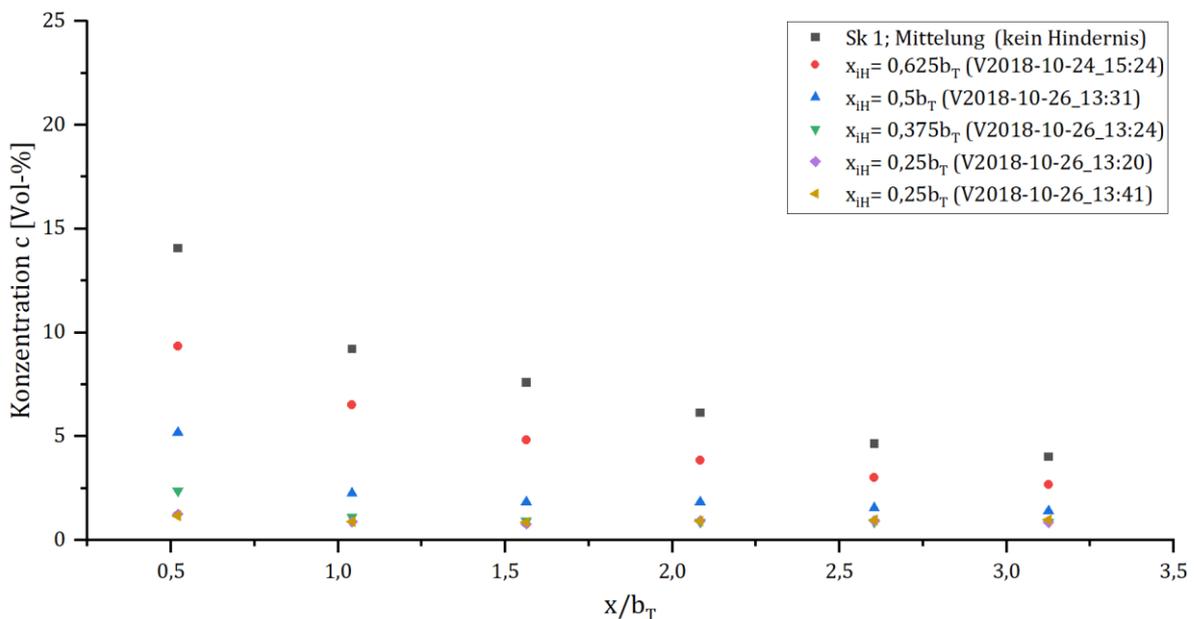


Abbildung 3-31: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei stromauf in unterschiedlichem Abstand  $x_{iH}$  zur Quelle platziertem Würfelhindernis ( $a_{iH} = 0,2b_T$ )

In Abbildung 3-31 sind neben der hindernisfreien Konfiguration die Konzentrationen an den axial mittigen Messpunkten für die Konfigurationen mit dem luvseitigen Würfelhindernis unter Sk 1 dargestellt, wobei der dimensionslose Abstand zur Quelle von Versuch zu Versuch variierte. Es zeigt sich, dass das luvseitige Hindernis erheblichen Einfluss auf die Konzentrationen innerhalb der Wolke nehmen kann. Im Einzelnen ist Folgendes zu beobachten:

- Bis zu einem Abstand des luvseitig in das Modellgebiet eingeführten Würfels von  $x_{iH} = 0,625b_T$  zur Quelle sinkt die Konzentration an den Messpunkten im Vergleich zum hindernisfreien Gebiet nur moderat ab, während der qualitative Konzentrationsverlauf erhalten bleibt.

- Mit weiterer Annäherung des Würfels an den Ort der Quelle sinken die quellnächsten Konzentrationen dann überproportional stark ab.
- Befindet sich der Würfel unmittelbar vor der Quelle, geht der exponentiell abnehmende longitudinale Verlauf in einen annähernd linearen, nur noch schwach abnehmenden über. Die longitudinale Verdünnung ist nur noch sehr gering.

Die gesamte Kurvenschar ähnelt der, wie sie bereits bei der Quellerhöhung (vgl. Abbildung 3-28) zu beobachten war.

Wird das Hindernis nunmehr in unmittelbarer Quellnähe ( $x_{iH} = 0,25b_T$ ) belassen und in weiteren Versuchen die Freisetzungsrates allmählich gesteigert, hebt sich, analog dem Befund zum Einfluss der Freisetzungsrates im hindernisfreien Fall, das Konzentrationsniveau wieder an (vgl. Abbildung 3-32). Der geringe longitudinale Konzentrationsgradient bleibt hierbei weitgehend erhalten.

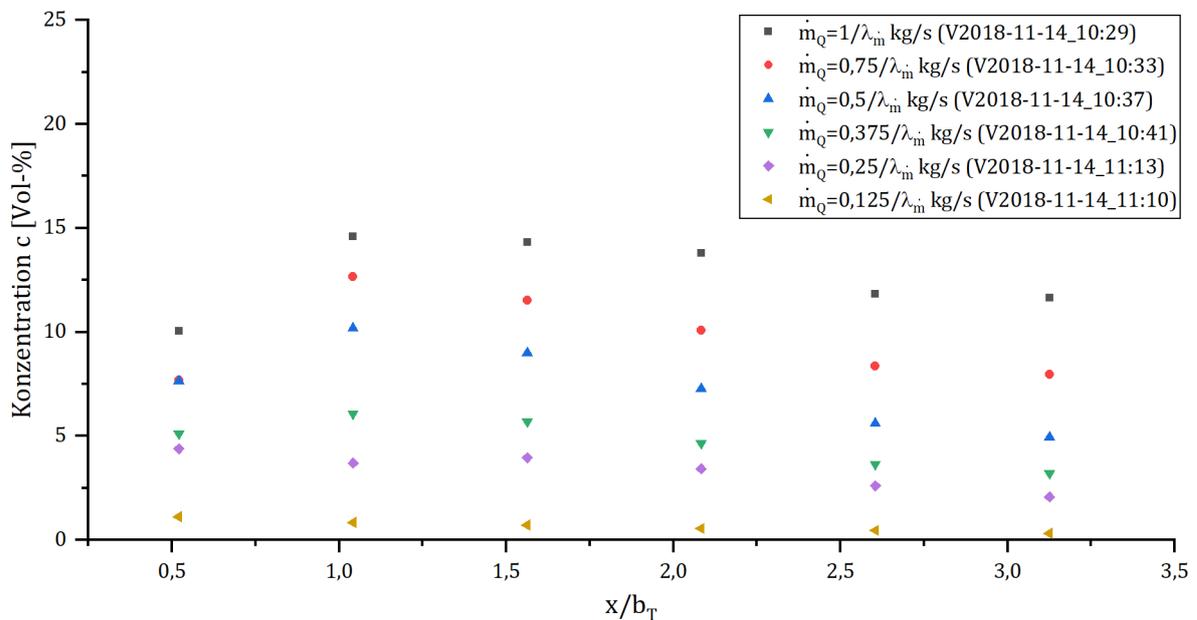


Abbildung 3-32: Longitudinaler Konzentrationsverlauf bei einem im Abstand von  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromauf von Quelle platzierten Würfelhindernis und  $U_{cT} = 1/\lambda_U \frac{m}{s}$  unter Variation der Freisetzungsrates

Ein besonderes Augenmerk ist in diesem Zuge auf den quellnächsten Messpunkt zu richten, dessen Konzentration entgegen der vorhergehenden Beobachtung besonders bei höheren Freisetzungsrates signifikant unterhalb der des nächstfolgenden Messpunktes liegt. Berücksichtigt man die diskutierten Strömungsregime um den stumpfen Körper (siehe Abbildung 2-5), kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Messpunkt im Totwassergebiet des Würfels bzw. in dessen unmittelbarem Einflussbereich befindet. Es ist deshalb anzunehmen, dass durch den größeren Turbulenzgrad in diesem Bereich eine verstärkte Verdünnung herrscht, die für die lokal geringeren Konzentrationen verantwortlich ist.

Untersucht man den Einfluss der Würfelkonfiguration nunmehr unter den Bedingungen von Sk 2, bietet sich ein anderes Bild, welches zu einer differenzierteren Bewertung des Hinderniseinflusses zwingt. Wie sich anhand von Abbildung 3-33 zeigt, sinken die Konzentrationen bei Anwesenheit des Würfels als auch bei weiterer Annäherung an die Quelle in der Tendenz zwar etwas ab, aber nur in einem Maße, dass unter Berücksichtigung der allgemeinen Streuung sich der longitudinale Konzentrationsverlauf weitgehend mit dem des leeren Modelltunnels deckt. Einzig am quellnächsten, im Einflussbereich des Totwassers befindlichen Messpunkt reduziert sich analog zu Sk 1 die Konzentration merklich.

Die Versuche lassen somit darauf schließen, dass ein wesentlicher verdünnungsfördernder Effekt nur bei unmittelbarer luvseitiger Quellnähe des Hindernisses gegeben ist und dabei auf niedrige Freisetzungsraten beschränkt bleibt.

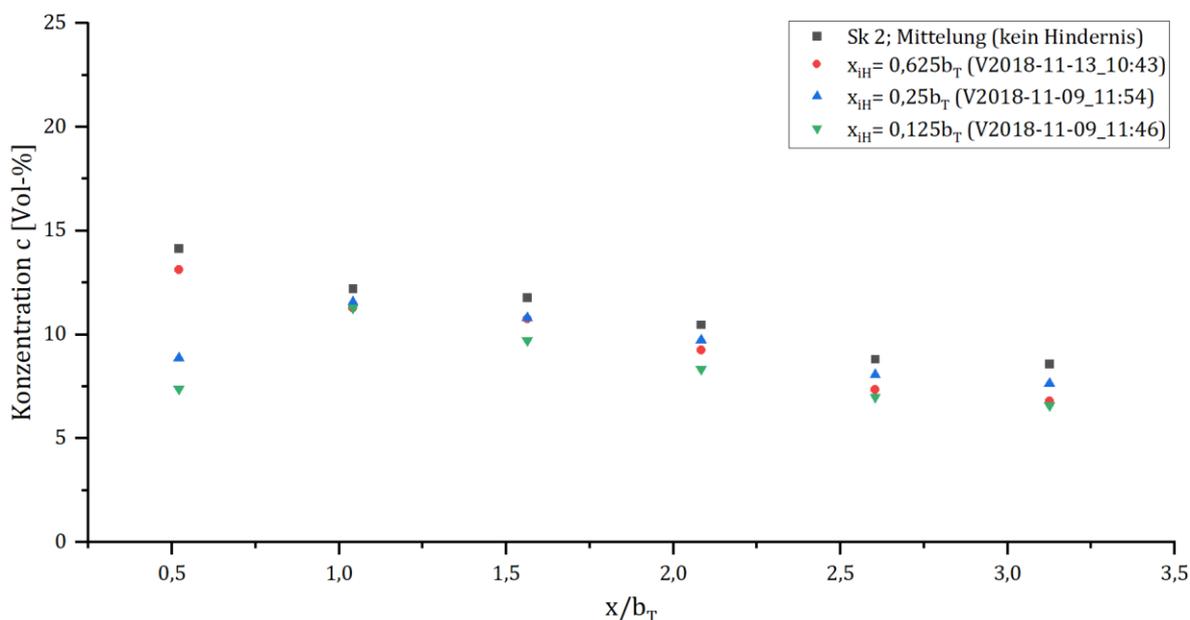


Abbildung 3-33: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei stromauf in unterschiedlichem Abstand  $x_{iH}$  zur Quelle platziertem Würfelhindernis ( $a_{iH} = 0,2b_T$ )

Sicherheitstechnisch ist die Anwesenheit eines einzelnen Hindernisses im Tunnel folglich von untergeordneter Bedeutung. Selbst bei niedrigen Freisetzungsraten spielt der geänderte qualitative Verlauf keine entscheidende Rolle, da wie sich zeigt die Konzentrationen quellfern nur in geringem Maße absinken, so dass im gesamten UZD-Bereich weiterhin unverändert von der Anwesenheit einer explosionsfähigen Atmosphäre ausgegangen werden muss.

### 3.8.2 Konzentration in erhöhter Messposition bei Anwesenheit des Einzelwürfelhindernisses stromauf der Quelle

Für die folgenden Betrachtungen wurden am Beispiel der Hindernisposition an  $x_{iH} = 0,25b_T$  die Konzentrationen an erhöhter Absaugposition gemessen. Die Messpunkte in Entfernung  $x_{QIR110} =$

$0,52b_T$  sowie  $x_{QIR510} = 2,6b_T$  befanden sich dabei wie bei den in Abschnitt 3.6.4 beschriebenen Versuchen in einer Höhe von  $z = 0,0625b_T$ . Erhöhte Konzentrationen in jener Höhe im Vergleich zu den Untersuchungen in Abschnitt 3.6.4 wären ein Beleg für den von *Wörsdörfer & Hartwig* beschriebenen Effekt des von Hindernissen induzierten vertikalen turbulenten Flusses in dessen rückwärtigem Bereich (vgl. [104]).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-3 aufgeführt. Im Vergleich zum hindernisfreien Fall (vgl. Abschnitt 3.6.4) sind danach die Konzentrationen unmittelbar im Lee (Messpunkt QIR110) des Hindernisses mit 177 % bzw. 304 % in der Tat erhöht. Eine abschließende Aussage hierzu ist angesichts der geringen absoluten Unterschiede und unter Berücksichtigung der allgemeinen Streuung der Messwerte aber nicht möglich. Unabhängig davon scheint dieser potentielle Effekt sodann auch auf den lokalen Bereich des Totwassers beschränkt zu bleiben, da am quellferneren Messpunkt die Konzentrationen mit 134 % nur noch geringfügig bzw. mit 100 % nicht mehr höher als im hindernisfreien Fall liegen. Die aus Abbildung 3-31 zu entnehmende durch das quellnahe Hindernis bedingte spürbare Abnahme der bodennahen Konzentrationen bei Sk 1 ist demgemäß vielmehr in einem besseren quellnahen lateralen Transport zu suchen.

Tabelle 3-3: Propankonzentration an erhöhter Messposition für Sk 1 und 2 mit Würfelhindernis stromauf der Quelle an  $x_{iH} = 0,25b_T$

		QIR110	QIR510
Sk 1	Konzentration an $z = 0,0625b_T$ , V2018-11-09_12:24	0,64 Vol-%	0,86 Vol-%
	Prozent der Konzentration an $z = 0,0625b_T$ bei V2018-11-08_11:39 (ohne Hindernis)	177 %	134 %
Sk 2	Konzentration an $z = 0,0625b_T$ , V2018-11-09_12:20	1,36 Vol-%	3,20 Vol-%
	Prozent der Konzentration an $z = 0,0625b_T$ bei V2018-11-08_11:42 (ohne Hindernis)	304 %	100 %

### 3.8.3 Positionierung eines Würfelhindernisses stromab der Quelle

Stichpunktartig wurde der Einfluss auf die Konzentrationsverteilung auch bei leeseitig angeordnetem Würfelhindernis untersucht. Unter den Bedingungen von Sk 1 wurde der Würfel dazu in unterschiedlichem Abstand stromab der Quelle platziert. Bei der verwendeten Hindernisentfernung  $x_{iH} = 3,6b_T$  befinden sich alle Messpunkte alsdann strömungsseitig vor dem Hindernis. Hierbei stellt sich, wie Abbildung 3-34 zu entnehmen, wiederum in Gänze der für das leere Modellgebiet bekannte Konzentrationsverlauf ein. Auch bei kleiner werdendem Abstand zur Quelle (vgl.  $x_{iH} = 2,5b_T$ ) decken sich die vor dem Hindernis befindlichen Konzentrationen annähernd mit dem des hindernisfreien Falls. Hiernach ist nicht von einer Beeinflussung der Wolke stromauf des Würfels wie z. B. einer Stauung des Schwergases durch jenen auszugehen.

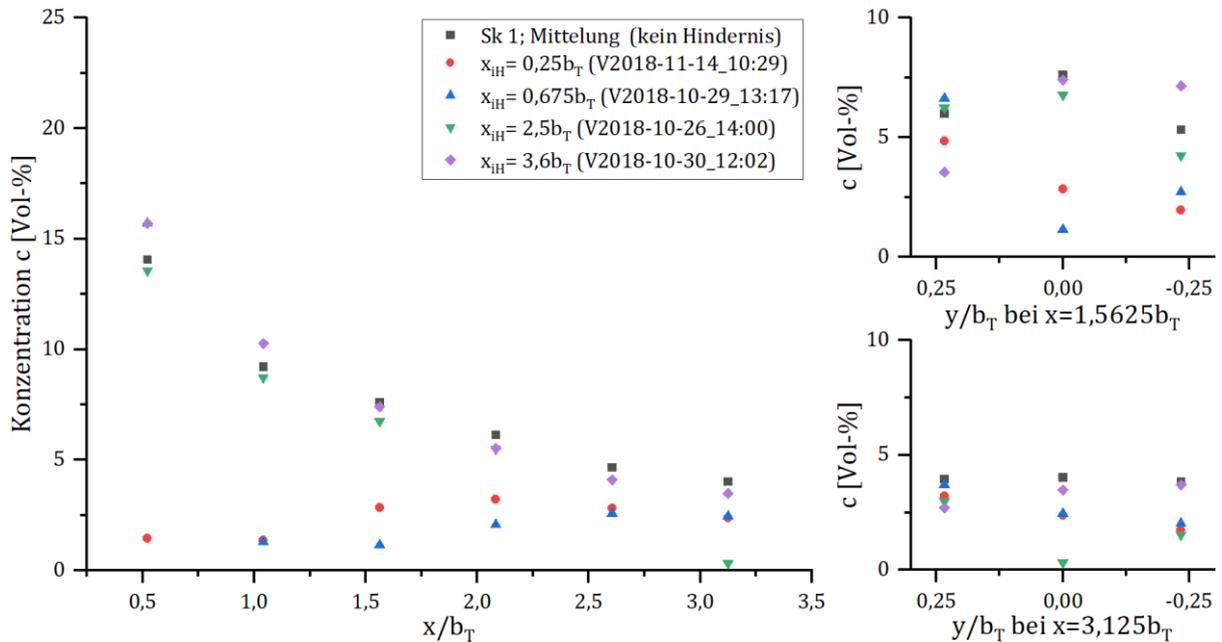


Abbildung 3-34: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei stromab in unterschiedlichem Abstand  $x_{iH}$  zur Quelle platziertem Würfelhindernis

Mit dem Passieren des Würfels ist dagegen in allen Anordnungen eine drastische Abnahme der Konzentrationen auf der Mittelachse verbunden. Im weiteren Verlauf scheinen die Konzentrationen sogar tendenziell wieder anzusteigen, so dass sich im direkten Windschatten bzw. Totwassergebiet das Konzentrationsminimum für das Modellgebiet einstellt. Gleichzeitig herrschen an den auf gleicher Höhe seitlich befindlichen Messpunkten im Mittel durchweg höhere Konzentrationen als mittig vor. Es drängt sich dabei die Vorstellung von einer zwangsweisen Zweiteilung der ankommenden Wolke beim Passieren des Hindernisses auf. Die zwei Teilströme strömen dann ihrerseits am Hindernis vorbei und vereinigen sich erst in weiterer Entfernung wieder. In das Totwassergebiet gelangt gleichzeitig nur wenig Propan, wie die jeweiligen Messwerte bestätigen. Ein global verdünnender Effekt scheint von dem Hindernis somit nicht auszugehen. Vielmehr wirkt sich die hierdurch eingebrachte Störung nur lokal auf die Wolke bzw. Konzentrationsverteilung aus.

In Abbildung 3-35 ist überdies die Kurvenschar der Konzentrationsverläufe für die leeseitige Anordnung des Würfels bei  $x_{iH} = 0,25b_T$  bei unterschiedlichen Freisetzungsraten aufgetragen. Der Würfel wies damit die gleiche Entfernung zur Quelle auf wie in Abbildung 3-32; befand sich aber statt stromauf nunmehr stromab der Quelle. Die bereits in Abschnitt 3.8.1 behandelten Auffälligkeiten treten auch in diesem Fall zutage. So hebt sich zum einen mit Zunahme der Freisetzungsrates das Konzentrationsniveau an, zum anderen herrschen im Totwassergebiet wiederum niedrigere Konzentrationen als weiter stromab. Verglichen mit der luvseitigen Hindernisanordnung (vgl. Abbildung 3-32) stellen sich bei identischen Freisetzungsraten leeseitig im Mittel jedoch ge-

ringförmig niedrigere Konzentrationen ein. Hinsichtlich der Konzentrationsverteilung ist dem Aspekt der in Strömungsrichtung vorhandenen Quell-Hindernisreihenfolge verglichen mit deren Abstand zueinander folglich nur eine geringe Bedeutung beizumessen.

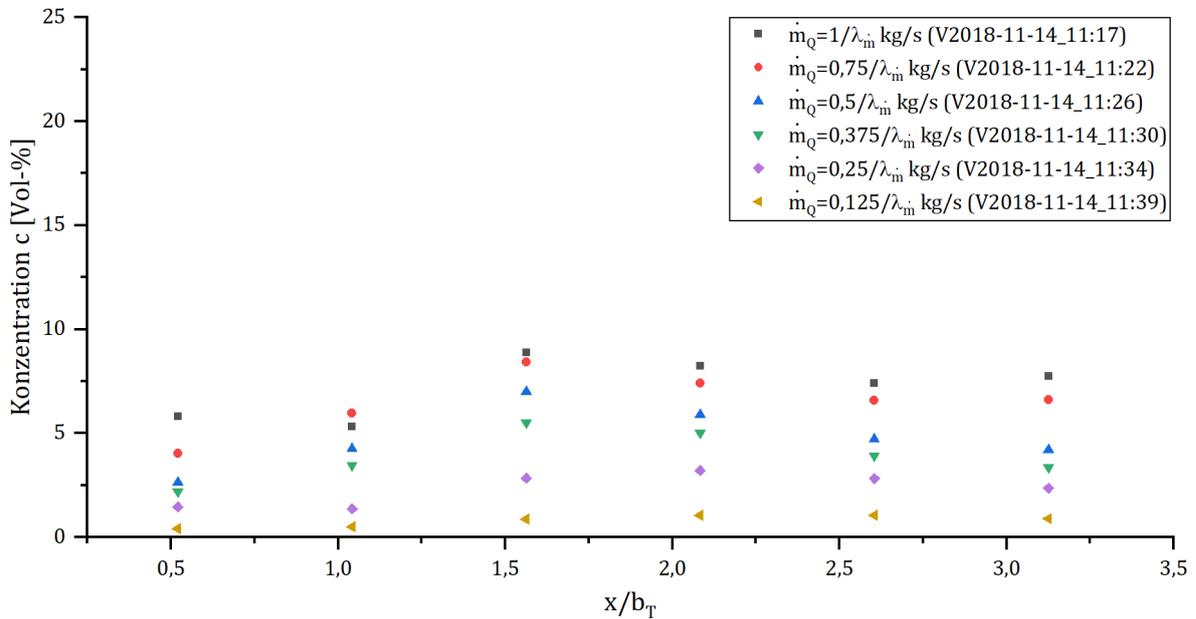


Abbildung 3-35: Longitudinaler Konzentrationsverlauf bei einem im Abstand von  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromab von der Quelle platzierten Würfelhindernis und  $U_{ccT} = 1/\lambda_U \frac{m}{s}$  unter Variation der Freisetzungsrates

### 3.8.4 Positionierung mehrerer Hindernisse in stauähnlicher Anordnung

Im Folgenden wurde die Anzahl der Hindernisse im Modellgebiet erhöht mit dem Ziel, die Verhältnisse im Modellgebiet dem Szenario eines Verkehrsstaus von Fahrzeugen im zweispurigen Tunnel anzunähern. Die Hindernisplatzierung wurde dabei mit der Maßgabe vorgenommen, dass keiner der Messpunkte mit einem Hindernis überbaut wird. Quader mit den Abmessungen  $l_{iH} = 0,4125b_T \times b_{iH} = 0,2b_T \times h_{iH} = 0,2b_T$  wurden als Hindernisse verwendet, um die Fahrzeuge nachzubilden. Die gewählten Anordnungen der Hindernisse im Modellgebiet sind im Anhang A4 gegeben.

In den Abbildungen 3-36 und 3-37 sind die Konzentrationsverläufe für Konfigurationen mit zwei, vier, sechs und acht stromab der Quelle platzierten Hindernissen für Sk 1 sowie Sk 2 aufgetragen. Erkennbar geht bei beiden Betriebsparameterstellungen mit der Hindernisanzahl nur eine geringe Änderung des Kurvenverlaufs einher. Zu beachten ist, dass sich bei diesen Konstellationen keine Hindernisse im Nahbereich der Quelle befanden. Im Vergleich zum hindernisfreien Gebiet zeigt sich mit Quellentfernung zwar ein verdünnungsfördernder Effekt, eine Verstärkung dieses Effekts bei Erhöhung der Anzahl der Hindernisse ergibt sich den Versuchsergebnissen nach indes nicht.

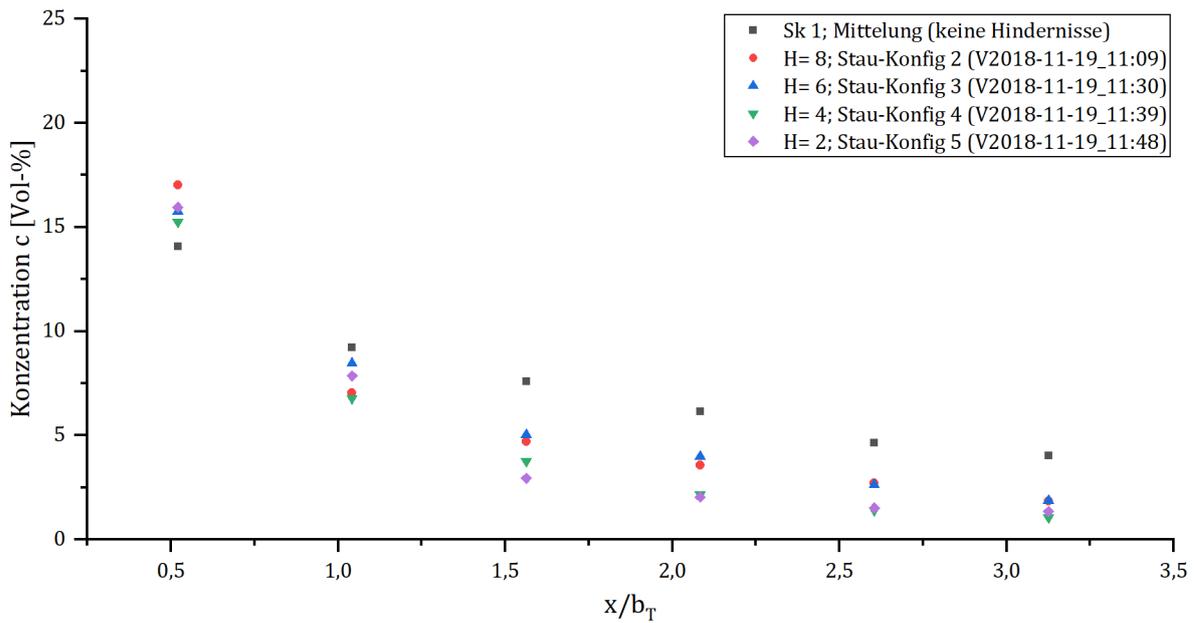


Abbildung 3-36: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 1 bei Erhöhung der Hindernisanzahl  $H$  (Hindernisanordnung nach Anhang A4)

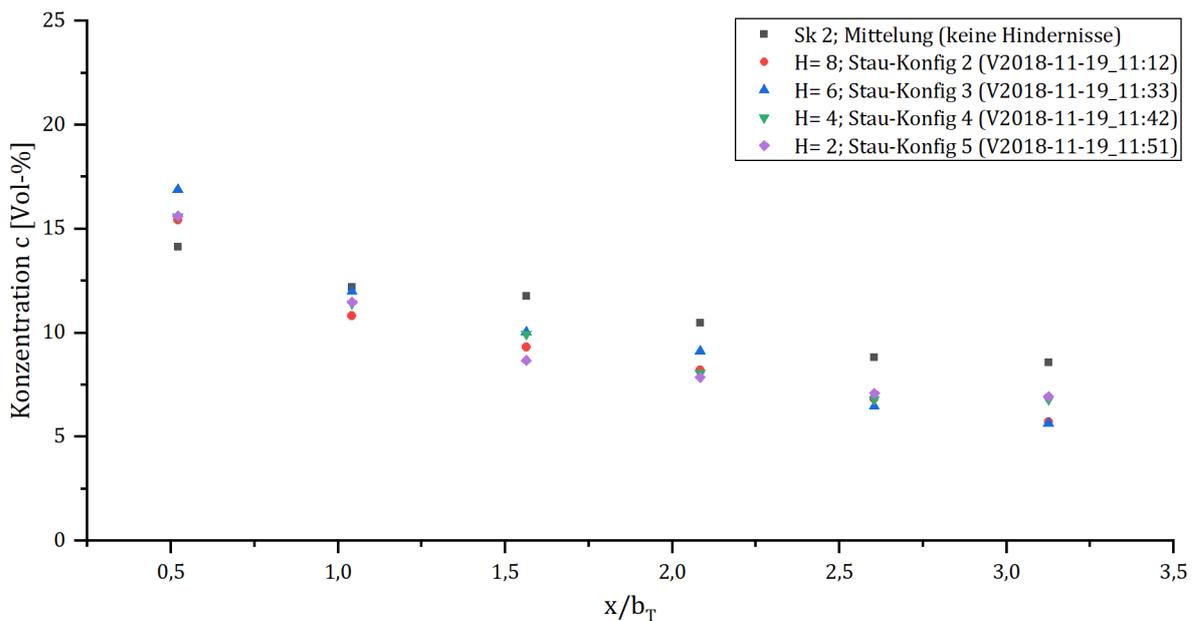


Abbildung 3-37: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei Erhöhung der Hindernisanzahl  $H$  (Hindernisanordnung nach Anhang A4)

Im Anschluss wurde der Einfluss einer quellnahen bzw. allseitig die Quelle umgebenden Hindernisansammlung am Beispiel der aus acht Hindernissen bestehenden Anordnung untersucht, indem diese in ihrer Gesamtheit von der ursprünglichen Position ausgehend zweimal jeweils um den Betrag von  $x_{iH} = 0,52b_T$  stromauf versetzt wurde.

Wie sowohl dem longitudinalen Konzentrationsverlauf in Abbildung 3-38 als auch 3-39 zu entnehmen ist, führt diese Handlung insbesondere quellnah zu einer deutlichen Zunahme der Konzentrationen. Für die Staukonfiguration 6, bei der sich die Hindernisse um die Quelle verteilen, werden demnach am quellnächsten Messpunkt Konzentrationen nahe des Messbereichsendwerts

der Gastransmitter erreicht. Je nach Konfiguration sinken die Konzentrationen anschließend individuell unterschiedlich stark ab.

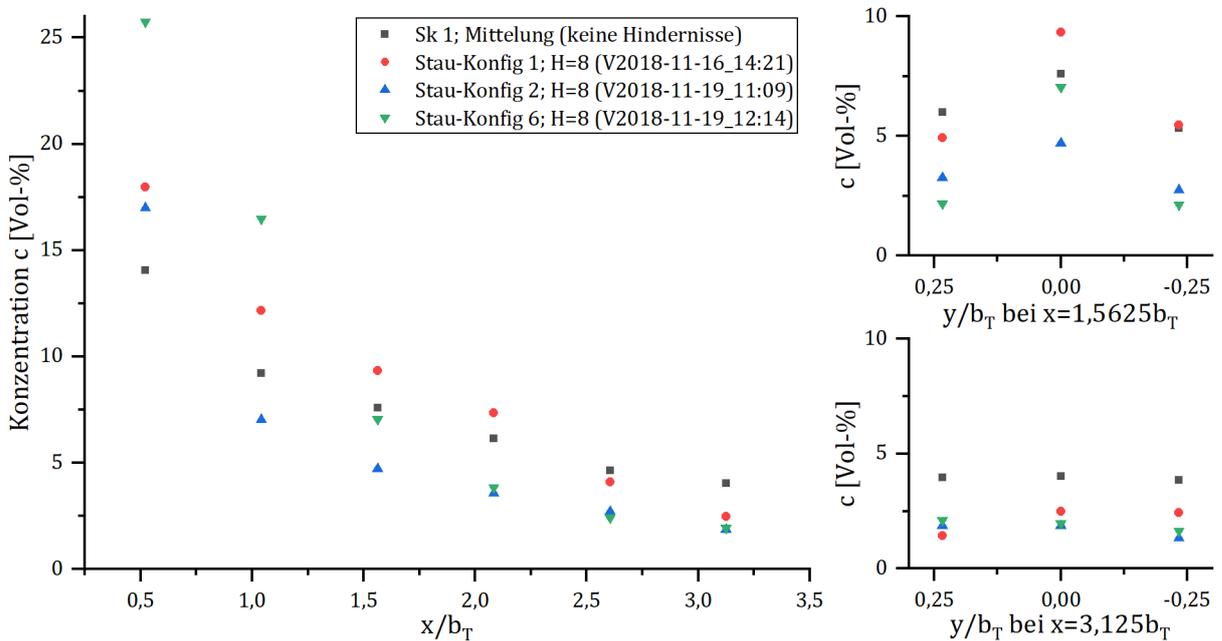


Abbildung 3-38: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 1 bei axialem Versetzen der stauähnlichen Anordnung aus acht Einzelhindernissen

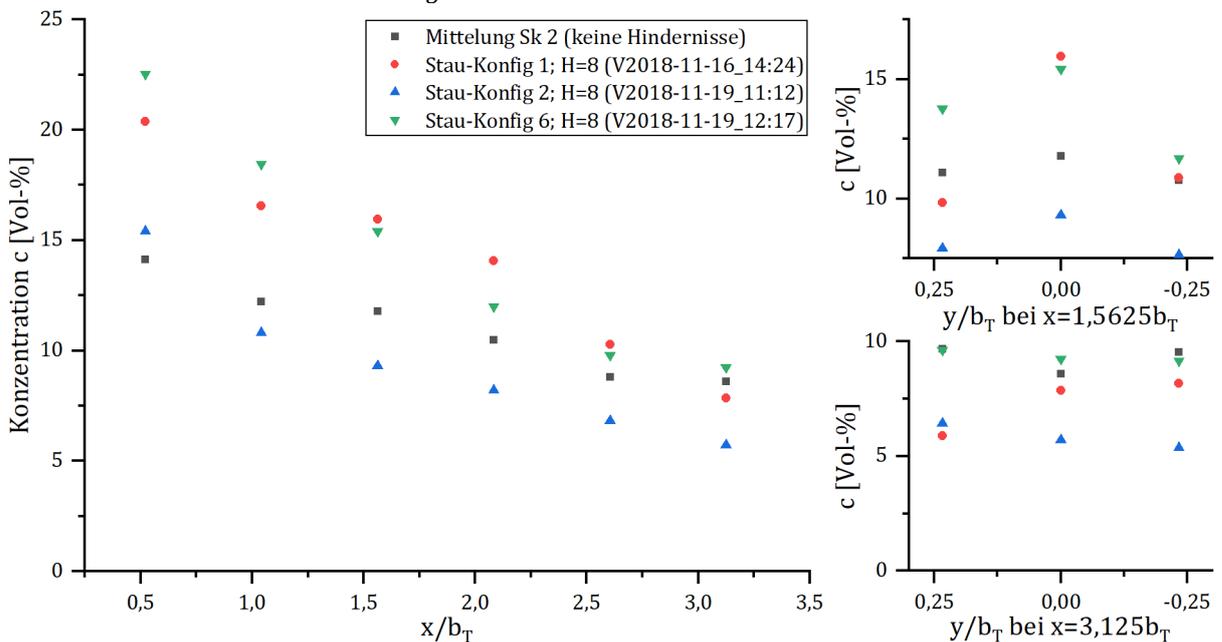


Abbildung 3-39: Longitudinaler und laterale Konzentrationsverläufe für Sk 2 bei axialem Versetzen der stauähnlichen Anordnung aus acht Einzelhindernissen

Die in Entfernung  $x = 1,5625b_T$  seitlich positionierten Messpunkte befinden sich bei den gewählten Anordnungen konfigurationsübergreifend jeweils in den Zwischenräumen zweier hintereinander aufgereihter Hindernisse. Es fällt auf, dass die Konzentrationen an diesen beiden Messpunkten über alle Konstellationen hinweg nicht nur erwartbar niedriger als die auf der Mittelachse sind, sondern teilweise stärker abfallen als im hindernisfreien Fall. Ähnlich wie dies im Windschatten am Einzelhindernis zu beobachten war, kann das Propan auch hier in die außerhalb

der Hauptströmung liegenden, aber turbulenten Zwischenräume augenscheinlich nur vermindert eintreten. Dass die Ausbreitung der Gase hierüber in die angeschlossenen Bereiche zwischen Hindernissen und der Tunnelwand behindert wird, kann erwartet werden. Wie stark die hindernisbedingte Kanalisierung der Gase im Endeffekt ist, ließ sich aufgrund fehlender Messpunkte in jenen Bereichen nah der Tunnelwand aber nicht bestimmen.

Ungeachtet der komplexen Verhältnisse in den Zwischenräumen der Hindernisse lassen die Ergebnisse bei Entfernung  $x = 3,125b_T$  erkennen, dass sich nach Passieren der Hindernisansammlung die Konzentrationen bei Sk 1 nicht nur lateral konfigurationsintern wieder einander angleichen, sondern unabhängig von der axialen Position der Hindernisanordnung die Konzentrationen auf einheitlichem Niveau unterhalb der des hindernisfreien Gebiets liegen. Für Sk 2 zeigen sich bezogen auf die Hindernisanordnungen an dieser Stelle indes noch Unterschiede in der Höhe der Konzentration, die Verläufe deuten aber ebenso auf eine baldige Angleichung noch oberhalb der UEG nur wenig weiter stromab hin. Gleichzeitig liegen die Konzentrationswerte anteilig in diesem Fall nah bei jenen des hindernisfreien Gebietes. Es legt nahe, dass der im Vorderen identifizierte verdünnungsfördernde Effekt sich wie bei beim Einzelhindernis (vgl. Abschnitt 3.8.1) auf niedrige Freisetzungsraten beschränkt.

Abschließend soll auf den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit bei der Stauanordnung eingegangen werden. In Abbildung 3-40 sind für die Staukonfiguration 1 die Konzentrationen bei Sk 2 sowie im Falle von um das Dreifache dazu gesteigerter Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. So wie bereits aus den vorhergehenden Untersuchungen bekannt ist, konnte in diesem Fall ebenfalls eine effektive Reduktion der Konzentrationen und damit Verkürzung der UZD durch Anheben der Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden.

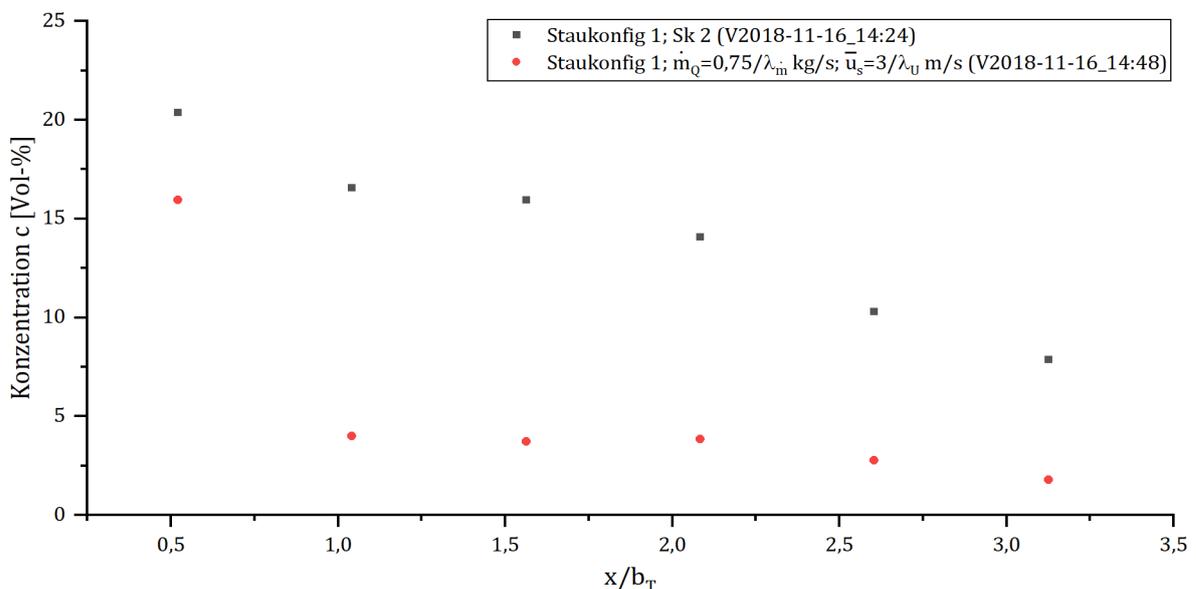


Abbildung 3-40: Longitudinaler Konzentrationsverlauf bei stauähnlicher Anordnung aus acht Einzelhindernissen für Sk 2 und bei Anheben der Strömungsgeschwindigkeit

## 3.9 Weiterführende Untersuchungen zur Ausbreitung schwerer Gase

### 3.9.1 Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs im hinderisfreien Modelltunnel

Für die gewonnenen, bodennahen Konzentrationen entlang der Mittelebene im Tunnel sollen im Folgenden Regressionskurven, die den longitudinalen Konzentrationsverlauf beschreiben, nach der *Methode der kleinsten Quadrate* abgeleitet werden. Da die Annahmen, welche für die Regression zu tätigen sind, vom Untersuchungsziel abhängen und damit nicht universell Gültigkeit besitzen müssen, wird die Regression für drei mögliche Sätze von Restriktionen vorgenommen.

Unbenommen der schwergassspezifischen Effekte stellt die Ausbreitung von Gasen generell einen Transportprozess (von Molekülen) dar. Transportprozesse werden allgemein durch die *Advektions-Diffusions-Gleichung* beschrieben. Lösungen der Gleichung führen auf eine räumlich exponentielle Abnahme der Konzentration vom Ort der Quelle aus (siehe bspw. [83]).

Entsprechend wird den folgenden Regressionen eine Exponentialfunktion zur Basis  $e$  der Form:

$$c_1(x) = c_0 + a_0 \cdot e^{-x/k_0} \quad (3.11)$$

als Modellfunktion zugrunde gelegt, wobei die Parameter  $c_0 \geq 0 \text{ Vol-\%}$ ,  $a_0 > 0 \text{ Vol-\%}$  und  $k_0 > 0$  erfüllen müssen. Weiterhin ist  $c_0 + a_0 \leq 100 \text{ Vol-\%}$  einzuhalten. Die Negation im Exponenten berücksichtigt die abfallende Monotonie. Da die Konzentration durch Diffusion naturgemäß gegen  $0 \text{ Vol-\%}$  strebt ( $\lim_{x \rightarrow \infty} c = 0$ ), wird im ersten Ansatz (Regression #1)  $c_0 = 0 \text{ Vol-\%}$  fixiert. Die Ergebnisse der Regression auf Basis dieser Restriktionen sind in Anhang A13, Tabelle A-7 aufgeführt. In Abbildung 3-14 ist exemplarisch die erhaltene Regressionskurve für Sk 1 dargestellt; analog in Abbildung 3-15 für Sk 2.

Ein Maß für die Güte der jeweiligen Anpassung ist das Bestimmtheitsmaß der Regressionskurve  $R^2$ , welches definiert ist als das Verhältnis der mit der angepassten Regressionskurve erklärten Varianz zur Gesamtvarianz der Konzentrationswerte. Es ist im konkreten Fall von Regression #1 mit im Mittel nahe 1 sehr hoch (vgl. Tabelle A-7). Da mit der Anzahl der Modellvariablen  $R^2$  steigt, kann es gemäß:

$$R_{cor}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{N - 1}{N - P - 1} \quad (3.12)$$

mit  $N$  als der Anzahl der zur Regression verwendeten Messwerte und  $P$  als der Anzahl der unabhängigen Variablen korrigiert werden. Mit diesem korrigierten Bestimmtheitsmaß  $R_{cor}^2$  können

nunmehr Regressionen mit verschiedenen Restriktionen und auf Basis unterschiedlicher Modellfunktionen miteinander verglichen werden und diejenige mit dem Optimum aus Modellkomplexität und -güte (= effizienteste Anpassung) ausgewählt werden. Entsprechend zeigt sich, dass die Aufhebung der Restriktion von  $c_0 = 0 \text{ Vol-\%}$  (Regression #2) zum Teil zu einer besseren Anpassung (höheres  $R_{cor}^2$ ) als unter  $c_0 = 0 \text{ Vol-\%}$  führt, vgl. Anhang A13, Tabelle A-8.

Regression #2 impliziert indes, dass es in der Ferne einen Punkt gäbe, ab dem keine Verdünnung der Gase im Tunnel mehr stattfände, was physikalisch aber nur schwer erklärbar wäre. Sinnhafter als ein prognostizierter konstanter Endwert der Konzentration größer  $0 \text{ Vol-\%}$  ist die Addition eines zusätzlichen analogen Exponentialterms (Regression #3) zu:

$$c_3(x) = a_0 \cdot e^{-x/k_0} + a_1 \cdot e^{-x/k_1} \quad (3.13)$$

Es gilt weiterhin  $a_0 > 0 \text{ Vol-\%}$  und  $k_0 > 0$ . Für die neu eingeführten Parameter wird weiter nur die Einschränkung  $a_1 \neq 0 \text{ Vol-\%}$  und  $k_1 \neq 0$  gemacht. Der zweite Term in (3.13) gestattet nun die Berücksichtigung von zwei Bereichen mit unterschiedlicher Verdünnungscharakteristik. Jene Trennlinie der beiden Bereiche wäre potentiell die Entfernung, an dem die Schwergase lateral die Tunnelwände erreichen. Ab dieser Entfernung wird dann die laterale Verdünnung unterbunden. Regression #3 liefert eine sehr gute Approximation des longitudinalen Konzentrationsverlaufes innerhalb des Wertebereiches von  $x$  mit im Mittel den höchsten  $R_{cor}^2$  der drei Regressionen, vgl. Tabelle A-9.

Die Regressionen wurden auf hindernisfreie Topologien bei bodennah mittiger Quelle beschränkt. Alle anderen mit dem Ziel der Untersuchung ihres Effekts getesteten geometrischen Anordnungen führen zu in den Abschnitten 3.7 und 3.8 offenbarten komplexeren Konzentrationsverteilungen, die sich in einer teilweise nicht mehr streng monoton fallenden Charakteristik des longitudinalen Konzentrationsverlaufs niederschlagen und damit die Annahme weitaus komplexerer Modellfunktionen voraussetzen. Insbesondere die getesteten hindernisbehafteten Szenarien, welche zwar gleichförmige Hindernisse aufwiesen, besitzen lediglich den Charakter von Spezialfällen, da sie nicht gleichmäßig über das gesamte Modellgebiet verteilt waren und sich dadurch einer verallgemeinerbaren Beschreibung des longitudinalen Konzentrationsverlaufs entziehen. Es bleibt für jede dieser Konstellationen eine Einzelfallbetrachtung notwendig.

### 3.9.2 Vereinfachte Beschreibung des longitudinalen Konzentrationsverlaufs für den hindernisfreien Modelltunnel

Auch wenn mit Hilfe einer Regression der Konzentrationsverlauf jeder einzelnen Konfiguration nachgezeichnet werden kann, würde der Umgang mit der Problemstellung – insbesondere im Hinblick auf die Ableitung der UZD und der nachgelagerten Schadensausmaßermittlung – deutlich

vereinfacht, wenn sich ein dimensionsloser Parameter finden ließ, von dem der Konzentrationsverlauf im hindernisfreien Modelltunnel einzig abhängig ist. In diesem Fall wären nicht mehr die Parameter einzeln, sondern nur noch die Kombination aus diesen von Belang. Naheliegend ist, dass es sich bei dem gesuchten Parameter um die densimetrische Froudezahl  $Fr_D$  handelt, welche die Trägheits- zu den Schwerkraften ins Verhältnis setzt. So haben *Britter & McQuaid* bereits die Wolkenform von einem solchen Verhältnis abhängig gemacht (vgl. [32]). In Abschnitt 3.7.1 konnte demgemäß gezeigt werden, dass die Parameter Freisetzungsrates und Strömungsgeschwindigkeit einen gegensätzlichen Einfluss auf den Konzentrationsverlauf im Modellversuchsstand nehmen. Wird  $Fr_D$  aus Gleichung (2.4) aufgelöst, tritt jener gegensätzliche Einfluss von Freisetzungsrates (hier der Volumenstrom) und Strömungsgeschwindigkeit auf den dimensionslosen Parameter  $Fr_D$  hervor:

$$Fr_D = \frac{U_{ccT}}{U_Q} = \frac{\bar{u}_S}{(\dot{V}_0 \cdot g_{eff}^2)^{1/5}} \quad (3.14)$$

Um diese postulierte Abhängigkeit auf Gültigkeit zu prüfen, sind in Abbildung 3-41 die gemessenen Konzentrationen an drei Sensoren in unterschiedlicher Quellentfernung für alle Konfigurationen aus Abschnitt 3.7.1 über die densimetrische Froudezahl aufgetragen. Dabei bildet sich entlang von  $Fr_D$  ein „Sägezahnmuster“ ab – die Funktion ist unstet. So springen nach dem abschnittsweisen generellen Absinken die Konzentrationen mit Zunahme von  $Fr_D$  wiederkehrend auf ein höheres Niveau zurück. Ein einziges globales Maximum der Konzentrationen, wie es *König* für das hindernisfreie Gebiet ableitete und bei  $Fr_D \approx 1$  taxierte [66], existiert damit im Tunnel nicht.

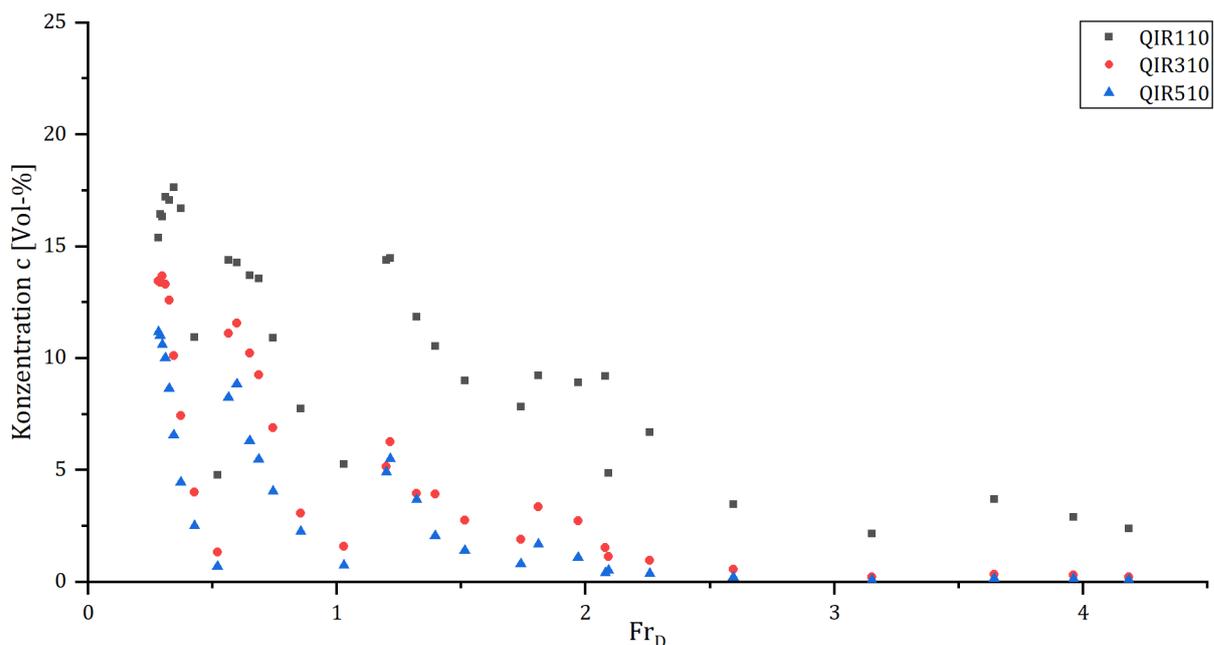


Abbildung 3-41: Konzentration für hindernisfreie Versuche in den Entfernungen  $x_{QIR110} = 0,52b_T$ ,  $x_{QIR310} = 1,5625b_T$  und  $x_{QIR610} = 3,125b_T$  über  $Fr_D$  aufgetragen

In Abbildung 3-42 sind die per Regression abgeleiteten longitudinalen Konzentrationsverläufe für einige ausgewählte Versuche mit unterschiedlichen  $Fr_D$ -Verhältnissen dargestellt. Kurven mit ähnlichem  $Fr_D$ -Verhältnis verlaufen teilweise zwar sehr nahe beieinander, andere Konfigurationen stehen aber ersichtlich im deutlichen Widerspruch hierzu.

Im Ergebnis ließe sich auf Grundlage von  $Fr_D$  somit keine verallgemeinerbare Systematik ableiten.

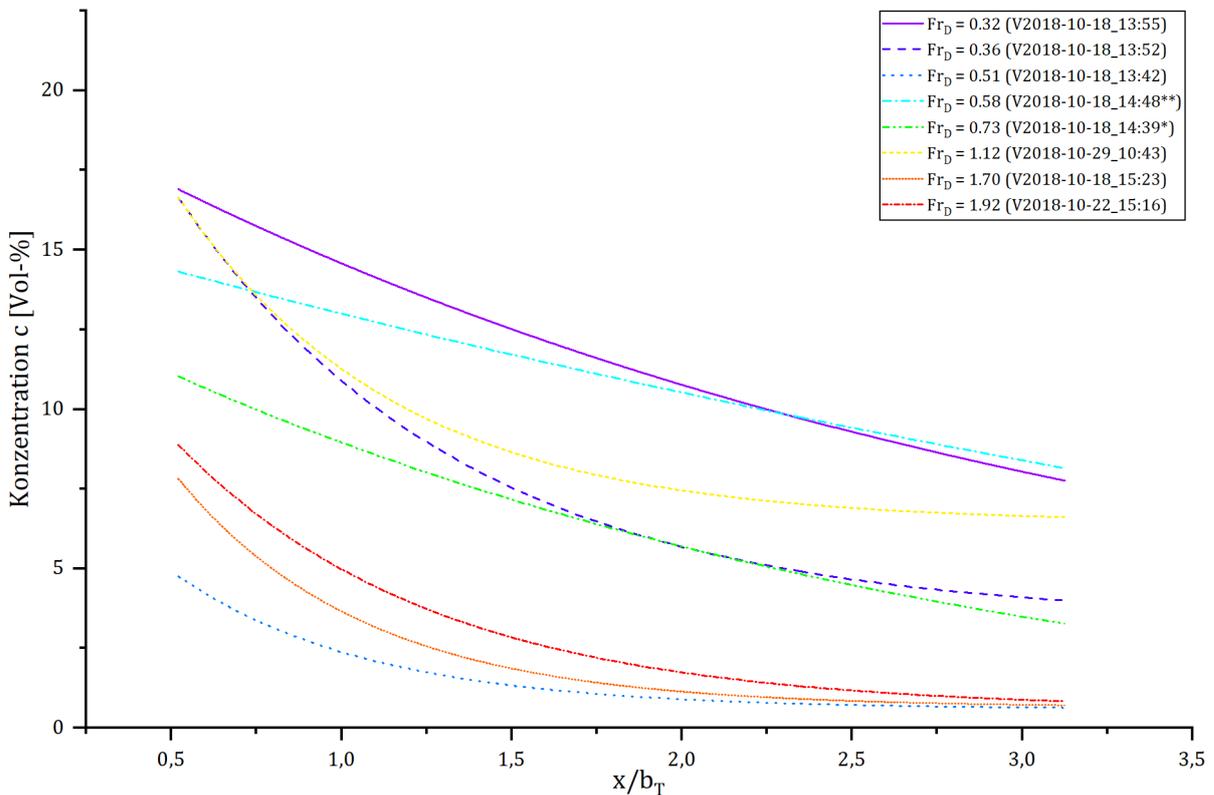


Abbildung 3-42: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für ausgewählte hindernisfreie Versuche mit unterschiedlichem  $Fr_D$ -Verhältnis

Bei näherer Betrachtung leuchtet ein, dass angesichts der seitlichen Begrenzung in Form der Tunnelwände Quellkonfigurationen mit zwar identischem  $Fr_D$ -Verhältnis eben nicht zwingend zu gleichen physikalischen Ausbreitungsvorgängen im Modelltunnel führen müssen. Für (impulsbehaftete) Schwergasstrahlen stellte *Donat* bei der windparallelen senkrechten Schlucht bereits eine Abhängigkeit der Konzentration von der Schluchtbreite fest (vgl. [40]). In Analogie dazu sollte die Tunnelbreite in Bezug zur Quellkonfiguration auch bei der Ausbreitung impulslos freigesetzter Schwergase einen gewissen Einfluss besitzen. Wird dementsprechend die densimetrische Froudezahl mit dem Quotienten aus Tunnelbreite und quellbezogener charakteristischer Länge multipliziert und die Konzentration nunmehr über diesen Parameter aufgetragen, so wie in Abbildung 3-43 vorgenommen, ergibt sich in der Tat ein annähernd stetiger – zudem exponentiell abfallender – Verlauf der Konzentrationen.

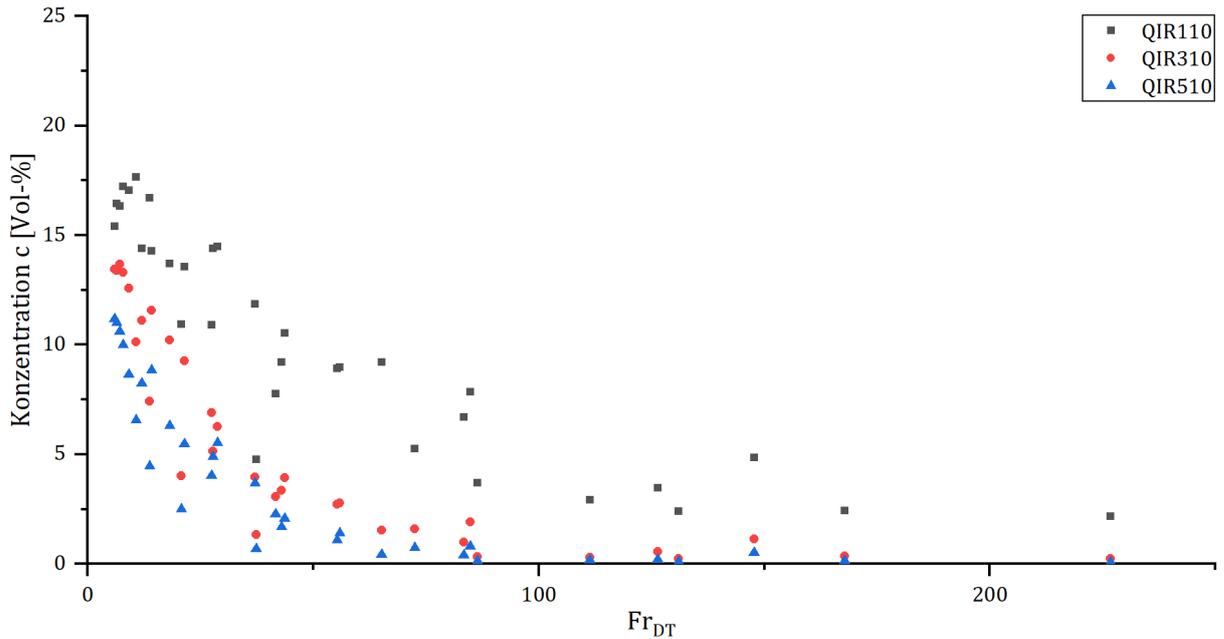


Abbildung 3-43: Konzentration für hindernisfreie Versuche in den Entfernungen  $x_{QIR112} = 0,52b_T$ ,  $x_{QIR312} = 1,5625b_T$  und  $x_{QIR612} = 3,125b_T$  über  $Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$  aufgetragen

Es ist somit möglich, den Konzentrationsverlauf im hindernisfreien Modelltunnel allein als Funktion eines dimensionslosen Parameters auszudrücken. Dieser neue Parameter soll als tunnelbreitebezogene densimetrische Froudezahl  $Fr_{DT}$  bezeichnet werden und berechnet sich nach Gleichung (3.15).

$$Fr_{DT} = Fr_D \cdot \frac{b_T}{L_Q} = \frac{\bar{u}_S \cdot b_T}{(\dot{V}_0^3 \cdot g_{eff})^{1/5}} \quad (3.15)$$

Die bodennahe Konzentration auf der Mittelachse in einer Entfernung  $x$  von der Quelle bemisst sich folglich nach:

$$c(x, 0, 0) = f(Fr_{DT}, x) \quad (3.16)$$

Die höchsten Konzentrationen ergäben sich bei den Konfigurationen mit den kleinsten realisierten  $Fr_{DT}$ -Verhältnissen ( $\approx 0,3$ ).

### 3.9.3 Vergleich der Ergebnisse mit dimensionsanalytischen Modellen

Bis hierhin wurden die Ergebnisse aus dem Modellversuchsstand für sich, losgelöst von den bestehenden dimensionsanalytischen Modellen, betrachtet. Da keines der Modelle aktuell die identifizierte Abhängigkeit des Konzentrationsverlaufs von  $Fr_{DT}$  explizit berücksichtigt, ist es geboten, die Anwendbarkeit sowie die Grenzen der Anwendung der bestehenden Modelle im Hinblick auf den Anwendungsfall der Tunnelumgebung zu bestimmen.

### 3.9.3.1 Vergleich der dimensionsanalytischen Modelle untereinander

In Vorbereitung des eigentlichen Vergleichs der Messergebnisse mit den Modellen sollen zunächst „modellintern“ die prognostizierten Konzentrationsverläufe der *VDI-Richtlinie* denen des Nomogramms von *Britter & McQuaid* (BM-Nomogramm) gegenübergestellt werden. Ein solcher Vergleich wird ermöglicht durch die Tatsache, dass sich beide von *Britter & McQuaid* verwendeten dimensionslosen Parameter für  $Fr_D = 1$  jeweils in die charakteristischen Größen der *VDI 3783 Blatt 2* umformen lassen: Der Term unter dem Bruchstrich der ersten Größe in Gleichung (2.10) entspricht dabei  $L_{cc}$ . Der Stabilitätsparameter ist das Reziproke von  $Fr_D$ , welches gleich dem Quotient aus mittlerer Windgeschwindigkeit und  $U_{cc}$  ist.

In Abbildung 3-44 sind die longitudinalen Konzentrationsverläufe für die mittlere Ausbreitungssituation aus der *VDI 3783 Blatt 2* (jenen liegen wie in Abschnitt 2.4.2 gezeigt die Windkanalergebnisse von *Marotzke* zugrunde) sowie der vom BM-Nomogramm prognostizierten Konzentrationen über  $x/L_{cc}$  aufgetragen. Diese Darstellung entspricht der in der *VDI-Richtlinie* gewählten Form. Des Weiteren wurden in das Diagramm Messergebnisse aus Windkanaluntersuchungen für die hindernisfreie ebene Platte sowie die senkrechte Schlucht anderer, ebenfalls in [72] angeführter Autoren aufgenommen.

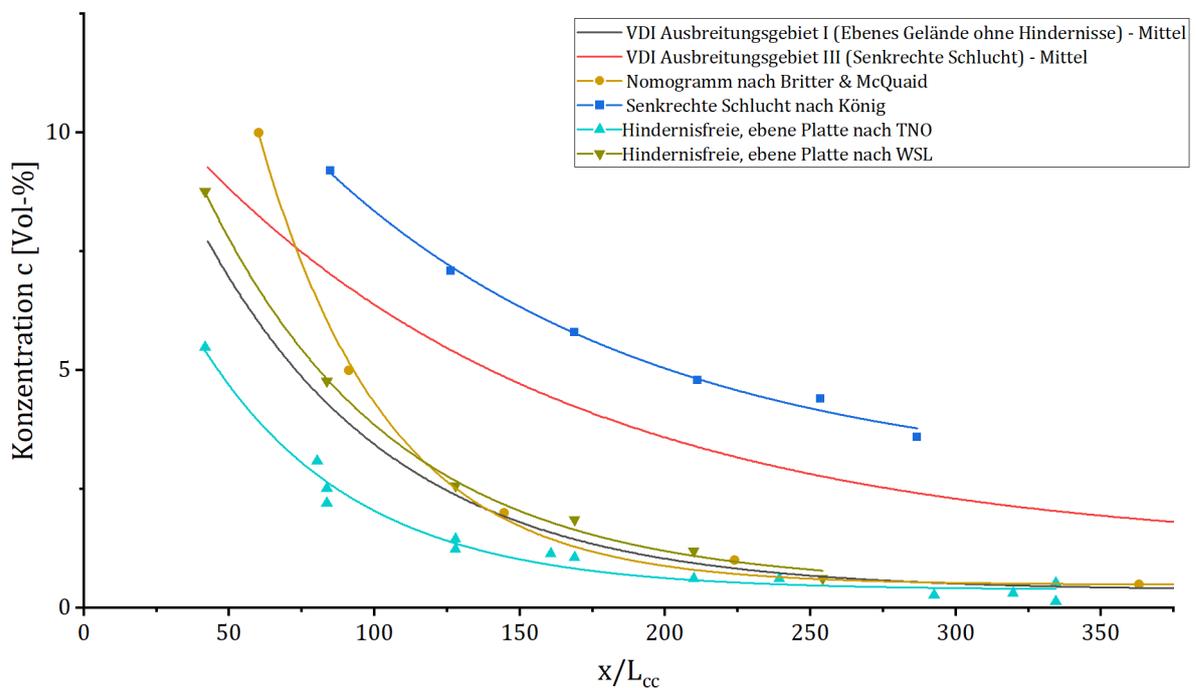


Abbildung 3-44: Longitudinaler Konzentrationsverlauf für die Konfigurationen der hindernisfreien, ebenen Platte sowie der Senkrechten Schlucht entsprechend verschiedener Messdaten aus der Literatur

Das Diagramm in Abbildung 3-44 offenbart für das hindernisfreie, ebene Gebiet einige quantitative Unterschiede zwischen den Konzentrationsverläufen. Bis auf die Ergebnisse der *TNO*, die durchweg die geringsten Entfernungen aufweisen, liegen die von *WSL*, *König* sowie *Marotzke*

(VDI) gemessenen als auch die vom BM-Modell prognostizierten Entfernungen im Bereich zwischen 1 Vol-% und 2 Vol-% nahe beieinander. Das BM-Modell und die VDI 3783 Blatt 2 unterscheiden sich in dem Bereich somit praktisch nicht. Indes nimmt die Diskrepanz sowohl oberhalb als auch unterhalb dieses Bereiches zwischen den Modellen zu, während das BM-Modell dabei durchweg die höchsten Konzentrationen vorhersagt.

Die absoluten Differenzen der Entfernungen können der Abbildung 3-45 entnommen werden. Dort ist nunmehr die Entfernung für die Konzentrationsverhältnisse aus dem BM-Nomogramm den auf diese Verhältnisse inter- bzw. extrapolierten dimensionslosen Entfernungen aus der Regression der Windkanaldaten für kontinuierliche Freisetzungen auf hindernisfreier, ebener Platte gegenübergestellt.

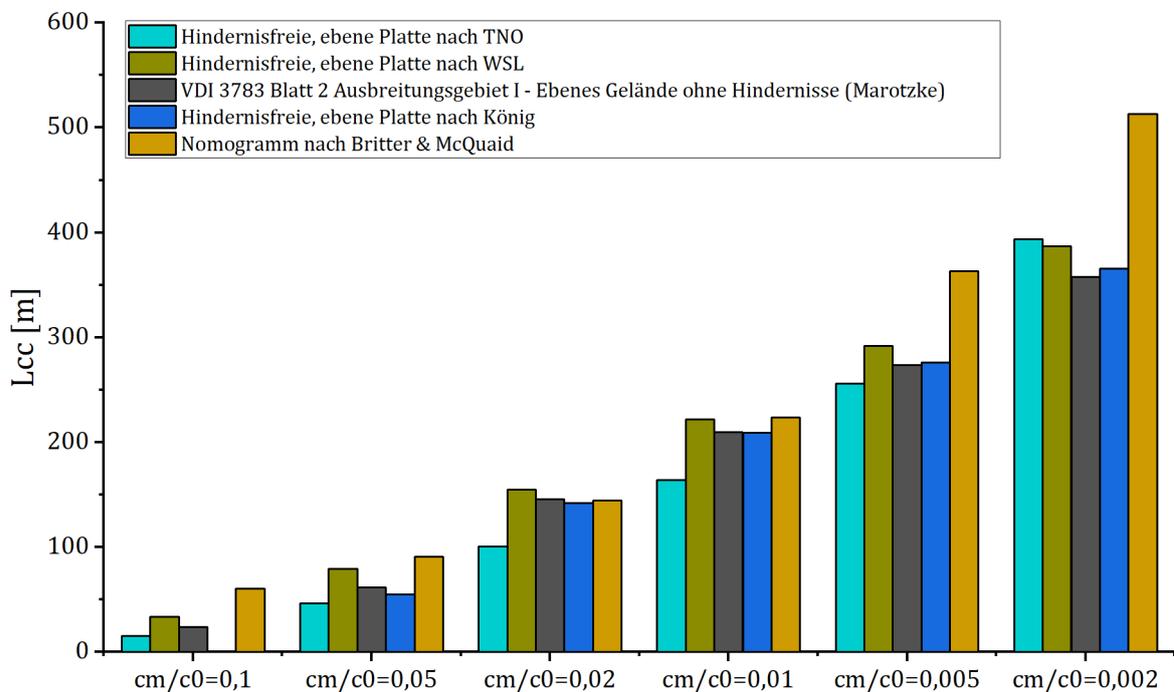


Abbildung 3-45: Vergleich von Literaturdaten für dimensionslose Entfernungen bei unterschiedlichen Konzentrationsverhältnissen kontinuierlicher Freisetzungen

Relativ beträgt die Differenz des BM-Modells zum jeweils zweithöchsten Wert der vorliegenden Auswahl maximal 180 %. Diese liegt in der von *Britter & McQuaid* selbst angegebenen Genauigkeit des Modells von 2, wogegen der in [80] geäußerten Ansicht, eine Auslegung auf Basis des BM-Modells sei prinzipiell konservativ, entsprechend der Gegebenheiten zwischen 1 Vol-% und 2 Vol-% in ihrer Pauschalität nicht zugestimmt werden kann.

Auf die quantitativen Unterschiede der Konzentrationsverläufe von *Marotzke (VDI)* und *König* für das Gebiet der senkrechten Schlucht, die ebenfalls Abbildung 3-44 zu entnehmen sind, wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 hingewiesen und soll hier nicht weiter eingegangen werden.

### 3.9.3.2 Vergleich der Messergebnisse mit den Literaturdaten

Aufbauend auf der Vorbetrachtung sollen nun anhand ausgewählter Konfigurationen die Versuchsergebnisse aus dem Modelltunnel mit denen der dimensionsanalytischen Modelle der *VDI 3783 Blatt 2* sowie von *Britter & McQuaid* verglichen werden.

Um die genannten Konzentrationsverläufe gemeinsam in einem Diagramm darstellen zu können, ist das tunnelbezogene Längenmaß  $L_{cCT}$  zunächst in das in der *VDI 3783 Blatt 2* verwendete quellbezogene Längenmaß  $L_{cc}$  ( $= L_Q$  in dieser Arbeit) umzurechnen. Da in  $L_{cc}$  wie gezeigt unter anderem die Freisetzungsrates  $Fr_{DT}$  eingeht (vgl. Gleichung (2.6)), überdecken sich in der Folge, wie Abbildung 3-46 zu entnehmen ist, die untersuchten  $L_{cc}$ -Bereiche insbesondere für kleine  $Fr_{DT}$ -Verhältnisse nicht in vollem Maße mit denen der Modelle.

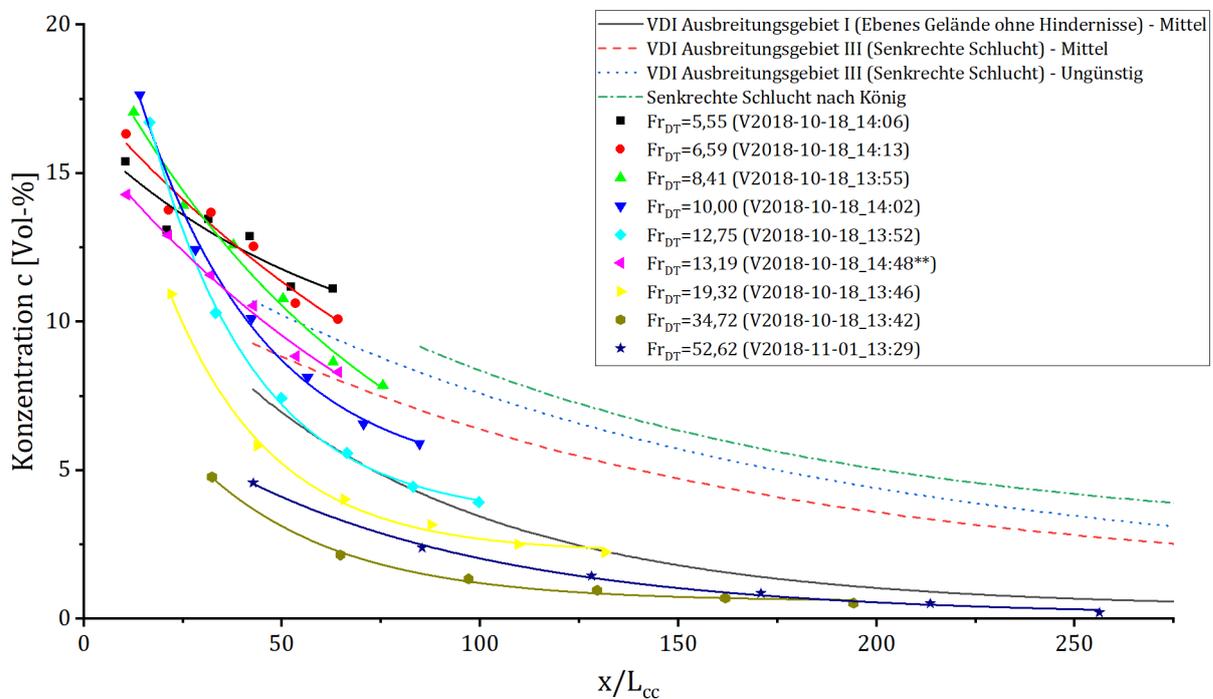


Abbildung 3-46: Longitudinale Konzentrationsverläufe für Auswahl hindernisfreier Versuche der Messkampagne im Modelltunnel sowie zum Vergleich Daten aus Windkanaluntersuchungen nach [66, 72]

Nach Abbildung 3-46 nimmt die Konzentration über  $L_{cc}$  je nach  $Fr_{DT}$ -Verhältnis einen unterschiedlichen Verlauf, wobei, wie bereits Abbildung 3-43 verdeutlichte, mit Ausnahme des unmittelbaren Nahbereichs der Quelle die Konzentrationen mit abnehmendem  $Fr_{DT}$ -Verhältnis im Allgemeinen sukzessive ansteigen. Konkret wurden bei den Konfigurationen mit den kleinsten getesteten  $Fr_{DT}$ -Verhältnissen im Entfernungsbereich, der von der *VDI 3783 Blatt 2* abgedeckt wird, höhere Konzentrationen als die *VDI 3783 Blatt 2* ausweist gemessen. Jene Konzentrationen liegen selbst oberhalb derer der als ungünstig in der VDI bezeichneten Situation. Insofern deckt die *VDI 3783 Blatt 2* nicht die kritischste, für den Tunnel angenommene Situation ab. Der Konzentrationsverlauf des Versuchs mit dem kleinsten umgesetzten  $Fr_{DT}$ -Verhältnis betrachtet ( $Fr_{DT} = 5,55$ )

scheint indes nach Extrapolation in den Verlauf der senkrechten Schlucht von *König* überzugehen, wemngleich der konkrete Nachweis aufgrund fehlender Überdeckung der Entfernungsbereiche aussteht.

Für steigende  $Fr_{DT}$ -Verhältnisse sinken die Konzentrationen – sodass sich die Werte bisweilen vollständig unter dem für das ebene Gelände ohne Hindernisse der *VDI 3783 Blatt 2* gültigen Verlauf befinden. Im Ergebnis legt Abbildung 3-46 nahe, dass spätestens ab einem  $Fr_{DT}$ -Verhältnis von 50 kein Einfluss durch die seitlichen parallelen Wände bzw. der Tunnelumgebung mehr auf den longitudinalen Konzentrationsverlauf gegeben ist.

### 3.9.4 Entwicklung eines Nomogramms für die Tunnelumgebung

Wie sich in den vorangegangenen Untersuchungen zeigte, sind die Abhängigkeiten der Verdünnung schwerer Gase innerhalb des längsdurchströmten Tunnels andere als im Freien, die von den bestehenden dimensionsanalytischen Modellen nicht erfasst werden. Um diese Lücke zu schließen, wird im Folgenden analog der Darstellungsweise von *Britter & McQuaid* ein Nomogramm für die kontinuierliche Freisetzung schwerer Gase in Tunnelumgebungen auf Basis der Ergebnisse des Modellversuchsstandes abgeleitet.

Da die von *Britter & McQuaid* gewählten Konzentrationsverhältnisse zum Teil außerhalb des individuell berücksichtigten Wertebereichs der Quellentfernung  $x$  der zugrundeliegenden Messergebnisse liegen und somit nicht direkt gemessen werden konnten, werden diese Werte anhand der in Abschnitt 3.9.1 abgeleiteten Regressionskurven extrapoliert. Wemngleich die Regression #3 innerhalb des individuellen Wertebereichs von  $x$  die Konzentrationsverläufe wie gezeigt jeweils sehr gut anpasst, führt diese außerhalb des Bereiches bedingt durch die Wahl der Modellfunktion offenkundig zu unrealistisch überhöhten Werten. Die im Nomogramm für  $L_{cCT} = f(Fr_{DT})$  in Abbildung 3-47 dargestellten Daten wurden deshalb aus den Regressionskurven der Regression #1 berechnet; die berechneten Werte für  $L_{cCT}$  sind im Anhang A14, Tabelle A-10 aufgeführt. Freilich ist dabei zu berücksichtigen, dass je weiter der extrapolierte Wert vom gemessenen Wertebereich entfernt liegt, desto größer dessen Unsicherheit ist.

Wie der Abbildung 3-47 zu entnehmen ist, liegen die Daten in doppeltlogarithmischer Darstellung für jedes der  $c_m/c_0$ -Verhältnisse jeweils annähernd auf einer mit  $Fr_{DT}$  abfallenden Geraden. Die zugehörigen Approximationsgeraden wurden per Regression bestimmt. Als Modellfunktion wurde das Potenzgesetz zugrunde gelegt. Die erhaltenen Nomogrammparameter sind im Anhang A15, Tabelle A-11 angegeben.  $R_{cor}^2$  liegt in einer Spanne von 0,75 bis 0,85. Die Varianz erklärt sich anteilig durch das Ableiten der Geraden auf Basis aller getesteter hindernisfreier Konfigurationen, wobei eben nicht nur die, die zu den höchsten Konzentrationen, d. h. der kritischsten Situation führten, berücksichtigt wurden (vgl. Abbildung 3-19 und Ausführungen dazu).

Wie der vorangegangene Abschnitt zeigte, ist für  $Fr_{DT}$ -Verhältnisse oberhalb 50 nicht mehr von einem Einfluss einer etwaigen seitlichen Begrenzung der Ausbreitungsumgebung auszugehen und für die Abschätzung im Rahmen einer Sicherheitsanalyse können weiterhin die aus der Literatur bekannten Modelle (*Britter & McQuaid, VDI 3783 Blatt 2*) verwendet werden. Zudem geht die Schwergasausbreitung bei hoher Anströmgeschwindigkeit allmählich in die dichteneutraler Gase mit abnehmenden Entfernungen über, welches nach *König* irgendwo zwischen  $2 < Fr_D < 10$  der Fall ist [66]. Im Nomogramm spiegelt sich dies wider durch ein überproportionales Abfallen der dimensionslosen Entfernungen ebenfalls ab etwa  $Fr_{DT} > 50$  und damit ab dem Punkt, ab dem alle getesteten Konfigurationen  $Fr_D > 1$  sind, wobei dies für die höheren Konzentrationsverhältnisse ausgeprägter scheint.

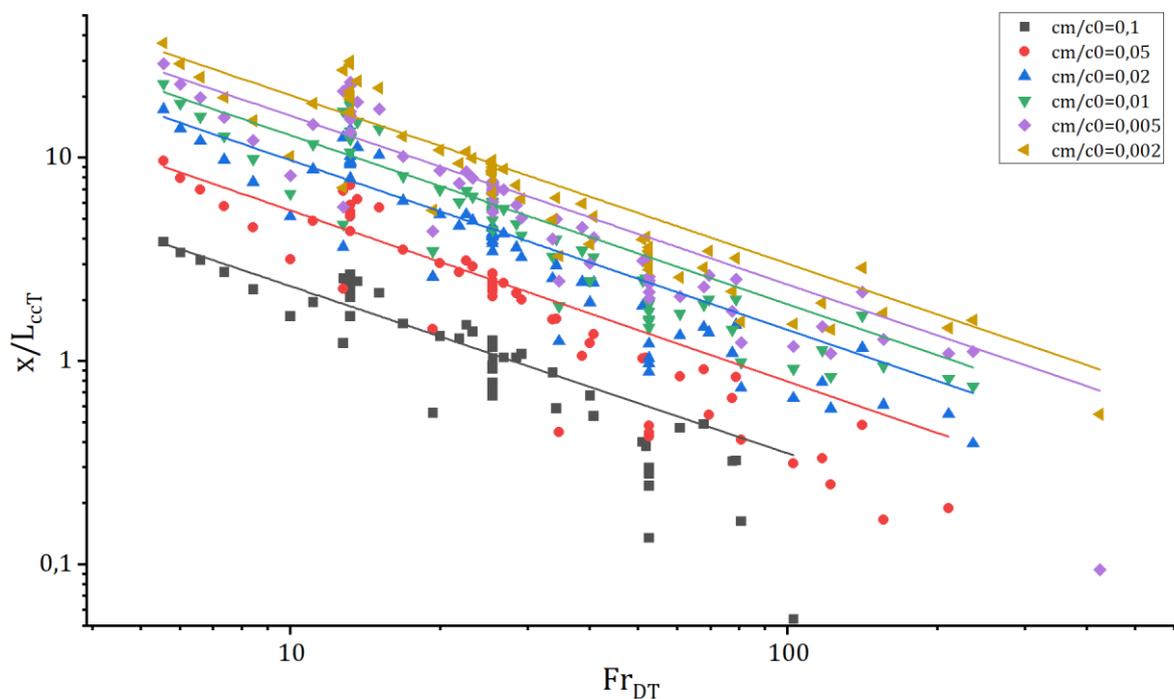


Abbildung 3-47: Nomogramm für  $L_{ccT} = f(Fr_{DT})$  der longitudinalen Konzentrationsverteilung für kontinuierliche Freisetzungen schwerer Gase in einer hindernisfreien, längsdurchströmten Tunnelumgebung

Da die Datenpunkte in Abbildung 3-47 zum Teil auf extrapolierten Werten beruhen, wird für die Zukunft empfohlen, die Datenbasis mit weiteren Versuchen zu vergrößern.

## 4 Untersuchungen im Originalmaßstab

Da bei kleinmaßstäblichen Versuchen im Allgemeinen nicht vollständige Ähnlichkeit erreicht werden kann, sollte prinzipiell jede Möglichkeit genutzt werden, die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse zu prüfen (vgl. [66]). Dies gilt in besonderem Maße nach Neukonzeption eines Versuchsstandes sowie bei der Anwendung auf neue Ausbreitungsgebiete, wie es die Tunnelumgebung darstellt. Versuchsergebnisse zur Ausbreitung von Schwergasen in realen Tunnelgeometrien sind in der Literatur nicht verfügbar, sodass eigene Ausbreitungsversuche im Originalmaßstab vorgenommen wurden, die in diesem Kapitel dargelegt werden.

### 4.1 Versuchsaufbau – der Großversuchsstand

In Abbildung 4-1 ist der im Rahmen des Projektes errichtete Versuchsstand als 3D-CAD-Modell dargestellt; für Details sowie Maßangaben siehe die Technische Zeichnung in Anhang A6.

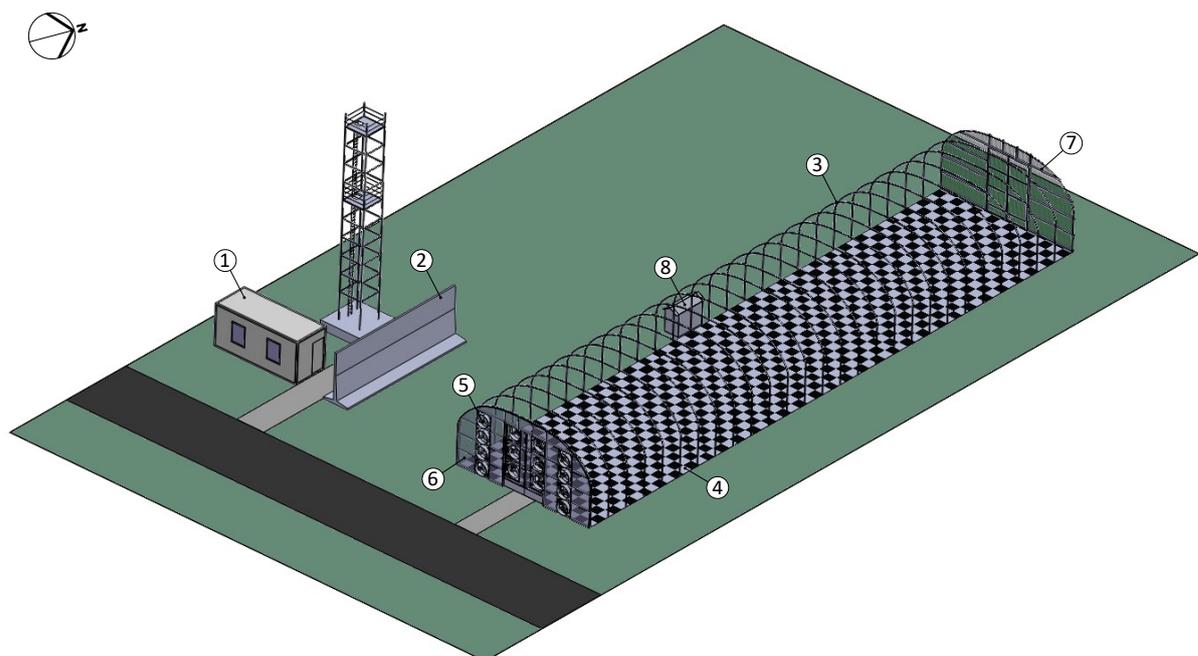


Abbildung 4-1: 3D-CAD-Darstellung des Großversuchsstandes (Geometriebeplanung ausgeblendet); Messwarte (Pos. 1), Betonwand (Pos. 2), Rundstahlbogen (Pos. 3), Folie mit Rastermarkierung (Pos. 4), Ventilator (Pos. 5), Doppelstegplatten (Pos. 6) Netz mit Maschenweite von 10 mm (Pos. 7), Versorgungseinrichtung und Unterstand für Messequipment (Pos. 8)

#### Standort

Für die Versuchseinrichtung wurde ein Standort (Geografische Koordinaten: 52°05'45.3"N 13°23'09.4"O) auf dem Freiversuchsgelände der BAM in Baruth/ Mark Nähe des Ortes Horstwalde ausgewählt. Der etwa 1 ha umfassende Teilbereich des Geländes entstand durch Rodung des in der Region vorherrschenden dichten Nadelwaldes und ist auch weiterhin allseits von hohen Kiefern umschlossen. Das Gelände vor Ort ist überwiegend eben. Die Versuchseinrichtung befindet

sich etwa mittig auf dem freigelegten Teilbereich auf einer ehemaligen Wiese, die vor Baubeginn von Bewuchsbefreit und anschließend planiert wurde.

### **Allgemeine Aspekte einer sicheren Versuchsdurchführung**

Die aus dem Grund größtmöglicher Ähnlichkeit gefällte Entscheidung, ebenfalls Propan als Versuchsgas einzusetzen, hatte weitreichende Konsequenzen für den Versuchsstandentwurf. Bei der Auslegung des Versuchsstandes sowie der technischen Hilfssysteme ist der Möglichkeit einer allzeit sicheren Handhabung vor, während und nach den Versuchen unbedingter Vorrang einzuräumen. Bei der Freisetzung eines brennbaren Gases in Luft besteht stets die Gefahr der Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre mit anschließender Zündung. Da die Freisetzung in diesem Fall bewusst und gewollt herbeigeführt wird, konnten im Sinne der Sicherheitstechnik nur noch Maßnahmen des sekundären wie tertiären Explosionsschutzes umgesetzt werden. Gleichzeitig wurden die Ausbreitungsversuche von einem umfangreichen und strikt vom Versuchspersonal zu befolgenden Sicherheitskonzept begleitet.

### **Messwarte**

Bezüglich des Personenschutzes wurde zuvorderst die Anforderung aufgestellt, Messwarte (Pos. 1) und Versuchsgeometrie soweit wie notwendig örtlich voneinander zu trennen. Die Messwarte bildete ein handelsüblicher 20'-Container. Dieser wurde zudem gegen etwaige thermische Strahlung und Fragmentwurf in Richtung der Versuchsumgebung von einer massiven Betonwand (Pos. 2) geschützt. Messwarte und Versuchsumgebung wurden unterirdisch signaltechnisch miteinander verbunden, so dass dem Versuchspersonal in der Warte ermöglicht wurde, die Versuche vollständig von der Ferne aus zu überwachen und zu steuern.

### **Versuchsstandgeometrie**

Grundlage bildete das eingangs gewählte Tunnelsegment. Eine reale gewölbeförmige Betontunnelgeometrie konnte aus diversen Gründen am Standort nicht umgesetzt werden. Als alternative Umschließungsstruktur wurden 28 verzinkte Rundstahlbögen (Pos. 3), die dem Gewächshausbau entstammten, in einem Abstand von jeweils 1,5 m zueinander errichtet. Diese Struktur wurde anschließend über ihren Umfang mit einer Plane aus robustem, reißfestem Stoff, der in dieser Form üblicherweise bei der Beplanung des Verladerraumes von Sattelschleppern zum Einsatz kommt, bespannt. Die Stirnseiten blieben für den Luftaustausch unverhüllt. Zur größtmöglichen Reflexion der Sonneneinstrahlung wurde der Stoff in der Farbe Weiß ausgeführt, welches das Aufheizen des Innenraumes insbesondere in den Sommermonaten effektiv verhinderte. Um eine Beeinflussung der innenliegenden Strömung durch den vorrangig vorherrschenden Westwind weitestgehend zu vermeiden, wurde die Umschließungsstruktur so ausgerichtet, dass die stirnseitigen Öffnungen

näherungsweise in Nord-Süd-Ausrichtung lagen. Die entstandene durchströmbare Geometrie besaß insgesamt eine Länge von 40,5 m, eine Breite von 9,6 m und eine Höhe von 4,95 m. Der Innenraum entspricht damit mit Ausnahme der Höhe geometrisch in guter Näherung dem Modellgebiet des Kleinversuchsstandes. Da die Schwergasausbreitung ausschließlich bodennah erfolgen sollte, wurde die Abweichung in der Höhe diesbezüglich als vernachlässigbar eingeschätzt. Der Erdboden wurde mit einer Folie (Pos. 4) ausgekleidet, die durch ihre regelmäßige Rastermarkierung die Positionierung des Versuchsequipments im Versuchsgebiet erleichterte.

### **Strömungsnachbildung**

Ziel der Strömungsauslegung war die Realisierung einer mittleren Tunnelströmungsgeschwindigkeit von 1 m/s. Die Strömung im Inneren wurde von 14 Ventilatoren (Pos. 5) des Typs *CasaFan 800*, welche druckseitig in einem Raster über den Einlassquerschnitt angeordnet waren, erzeugt. Anders als im kleinmaßstäblichen Versuchsstand saugten die Ventilatoren so im Betrieb ausschließlich Umgebungsluft an, so dass im Sinne einer sicheren Versuchsdurchführung eine Entzündung der nunmehr erwartbar größeren explosionsfähigen Atmosphäre an diesen ausgeschlossen werden konnte. Von Nachteil könnte sich bei dieser Anordnung hingegen die durch die rotierenden Lüfterschaufeln erzeugte Turbulenz im Ausbreitungsgebiet ergeben. Um einen Windeinfluss auslassseitig zu verhindern, der ebenso als Störquelle der Ausbreitung wirken könnte, wurden einerseits eingangsseitig die Zwischenräume der Ventilatoren mit Doppelstegplatten (Pos. 6) verschlossen, andererseits über den gesamten Auslassquerschnitt ein Netz mit einer Maschenweite von 10 mm (Pos. 7) aufgespannt, die die großflächigen Wirbel der auslassseitig eintretenden Windböen in kleinere, wirkungsärmere zerteilen sollten.

### **Messen der Windbedingungen**

Zur permanenten Überwachung der Windbedingungen um die Versuchsumgebung wurde ein System aus mehreren Schalenkreuzanemometern sowie einem Windrichtungsgeber in größtenteils exponierten Lagen um den Versuchsstand installiert. Die Positionen der Einzelsensoren sind der Technischen Zeichnung in Anhang A6 zu entnehmen. Auf geeignete Windverhältnisse konnte anschließend bei der Wahl der Versuchszeiten geachtet werden.

### **Strömungsmessung im Ausbreitungsgebiet**

Für die Strömungsmessung innerhalb der Tunnelgeometrie stand eine begrenzte Anzahl mobiler Ultraschallanemometer (USAM) des Typs *METEK USA-1* (neue Bezeichnung: *uSonic-3*) aus dem meteorologischen Einsatz zur Verfügung. Die Funktionsweise von USAM basiert auf dem Aussenden und Empfangen von Ultraschallsignalen, deren Lauflänge additiv durch die überlagerte Strömung verändert wird. Das Messprinzip ist temperatur- und feuchtigkeitskompensierend. Die Geräte erfassten die Strömungsgeschwindigkeit in die drei Raumrichtungen mit einer Frequenz von

25 Hz, sodass auch turbulente Fluktuationen der Strömung mit ausreichender Auflösung erfasst werden können [6]. In den Voruntersuchungen zum zugrundeliegenden Strömungsfeld konnte gleichzeitig auf insgesamt vier USAM gleichen Typs (zwei davon in der Ausbaustufe *Scientific* mit Turbulenzerweiterung) zurückgegriffen werden. Bei den eigentlichen Freisetzungsexperimenten standen zwei Geräte zur Verfügung – eines mittig 10 m vom Auslass entfernt (s. Anhang A6) und das andere jeweils unmittelbar am Quellort.

### Quellaufbau zur Gasfreisetzung

Den Quellaufbau zeigt schematisch Abbildung 4-2. Der gesamte Quellaufbau gliederte sich in die mobile Quellversorgungseinheit, in der das Propan gespeichert und für den Versuch konditioniert wurde sowie die stationäre Quellgeometrie, dem eigentlichen Ort der Freisetzung des Gases in die Versuchsgeometrie. Das hinsichtlich der Quellkonfiguration maßgebende Auslegungskriterium bildet die Anforderung nach einer kontinuierlichen Freisetzung konstanter Rate. Die im Modelltunnel gewählte Messdauer entspricht unter Beachtung der Zeitskala im Originalmaßstab einer Ausströmdauer von 07:30 Minuten. Für diesen Zeitraum muss die Kontinuität der Quelle näherungsweise gewährleistet sein.

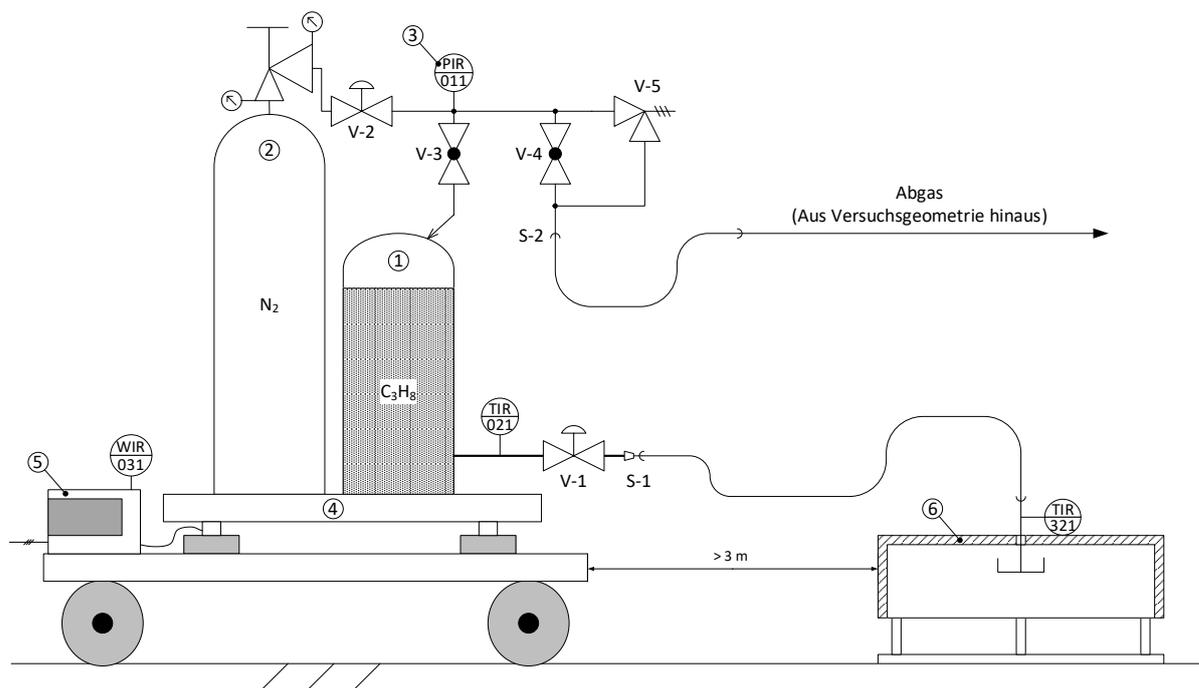


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Quellversorgungseinheit mit Quellgeometrie; Puffergefäß (Pos. 1), 200-bar-Stickstoffflasche (Pos. 2), piezoresistiver Druckaufnehmer (Pos. 3), Waage (Pos. 4), Waagen-Auswerteeinheit (Pos. 5), Quellgeometrie (Pos. 6)

Die Quellversorgung bestand aus einem Puffergefäß (Pos. 1) zur Speicherung der pro Versuch freizusetzten Gasmenge sowie einer handelsüblichen Stickstoffflasche mit einem Nenndruck von 200 bar (Pos. 2) inklusive für den Betrieb notwendiger Peripherie. Als Puffergefäß stand eine Gasflasche mit einem Speichervolumen von 52 l zur Verfügung. Wird Propan in einem geschlossenen

System gespeichert, so herrscht in der Flasche ein Zweiphasengemisch aus schwererem flüssigen Propan am Boden und einer darüber befindlichen leichteren gasförmigen Propanphase. In der Flasche treten solange Phasenübergänge auf, bis sich der temperaturabhängige Dampfdruck von Propan eingestellt hat. Die Phasen befinden sich dann im thermodynamischen Gleichgewicht.

Das Puffergefäß verfügte im unteren Bereich über einen 2“-Rohrstutzen, über den die Flasche einerseits gefüllt und andererseits das Propan im flüssigen Zustand freigesetzt werden konnte. Dazu war das pneumatische Absperrventil V-1 mit Druck zu beaufschlagen. Dies geschah im Versuchsbetrieb über eine Ventilsteuerung und elektro-pneumatische Stellglieder von der Messwarte aus. Der Massenstrom, mit dem das flüssige Propan anschließend freigesetzt wurde, bemisst sich neben der Gestalt und Größe der Öffnung unter anderem nach dem Flaschendruck und der Höhe der Flüssigkeitssäule. Demnach baut sich der Druck bei sinkendem Flüssigkeitsspiegel in der Flasche sukzessive ab, was mit einem sinkenden Massenstrom einhergeht. Dies lässt sich verhindern, indem bspw. das Druckniveau künstlich aufrecht gehalten und damit vom sinkenden Flüssigkeitsspiegel entkoppelt wird. Hierzu wurde das Puffergefäß mit einem weiteren Rohrstutzen, diesmal auf Höhe der Flaschenschulter, versehen, der den Anschluss der Gasphase an ein externes Druckreservoir ermöglichte. Das höhere Druckniveau wurde von der mit dem Puffergefäß verbundenen Stickstoffflasche bereitgestellt und über den stickstoffseitigen Flaschendruckregler vorgewählt. Durch Betätigen des pneumatischen Ventils V-2 und Öffnen des Küchenhahns V-3 wurde die flüssige Propanphase mit dem vorgewählten Druck beaufschlagt. Der Flaschendruck im Puffergefäß ließ sich so unabhängig vom Dampfdruck von Propan frei justieren und über die gesamte Versuchsdauer näherungsweise konstant halten. Das resultierende Zeitverhalten der Freisetzungsrates wird in Abschnitt 4.2.2 diskutiert.

Der Flaschendruck wurde permanent von einem piezoresistiven Druckaufnehmer (Pos. 3) des Typs *KELLER PA-10TAB/50 bar* erfasst. Von der Verbindungsleitung zweigte zusätzlich eine weitere Rohrleitung ab, die aus dem Versuchsgebiet herausführte. Dieser Weg war im regulären Betrieb verschlossen. Bei einem unkontrollierten Druckanstieg in der Pufferflasche über einen vorgegebenen Schwellwert hingegen hätte das installierte federbelastete Überdruckventil V-5 angesprochen und die Verbindung freigegeben. In der Folge wäre das Gas kontinuierlich ins Freie abgelassen und ein Bersten der Flasche wäre vermieden worden. Ein Bypass über den Küchenhahn V-4 ermöglichte ebenso eine händische Freigabe der Verbindung.

Die gesamte Apparatur wurde zur Messung der Freisetzungsrates auf einer Waage (Pos. 4) des Typs *Sartorius CW1S4-150IG-I* stationiert, die sich ihrerseits auf einem von Hand verfahrbaren, mobilen Geräteträger befand. Über die Auswerteeinheit (Pos. 5) der Waage wurden die Daten in die Messwerte übertragen. Die Mobilität war notwendig, da sich Füllort und Versuchsgebiet voneinander entfernt befanden. Die Füllprozedur ist in Anhang A8 beschrieben.

Der gesamte Quellaufbau befand sich während der Versuche in der Versuchsumgebung. Der Einfluss des Quellaufbaus auf Strömung und Ausbreitung wird als gering eingeschätzt, da die der Strömung orthogonale Fläche der Apparatur im Vergleich zur durchströmbaren Gesamtfläche gering war.

### **Quellgeometrie**

Nach dem Öffnen des Absperrventils V-1 gelangte das noch flüssige Propan aus der Pufferflasche über eine Schlauchleitung von 3 m in die Quellgeometrie, die für einen gleichmäßigen, annähernd impulsfreien Austritt optimiert war. Der Durchmesser der Leitung betrug am Auslass  $\frac{1}{4}$ ". Die Quellgeometrie bestand aus einem auf dem Boden stehenden, zylindrischen Fass (Pos. 6) mit einem Durchmesser von 0,6 m und einer Höhe von 0,3 m. Das Fass besaß bodennah über den Umfang einen Schlitz von etwa 0,1 m Breite, aus dem das Propan ins Freie austreten konnte. Diese Anordnung bewirkte, dass der von der Deckfläche ins Fass eintretende impulsbehaftete Propanstrahl zuvorderst gegen die Wände des Gefäßes geleitet wurde und hier seinen geschwindigkeitsgetriebenen Impuls größtenteils abbauen konnte und erst im Anschluss das Gefäß – dann annähernd impulsfrei – verließ. Unterstützt wurde dies durch ein eigens gestaltetes Ende der Rohrleitung, welches ins Fass reichte und das dahingehend in Voruntersuchungen optimiert wurde. Im Fass erfolgte ebenfalls der unvollständige Übergang des Propans vom flüssigen in den gasförmigen Zustand. Der Anteil des flüssig verbliebenen Propans wurde in einer Wanne aufgefangen. Zur Dokumentation der Propantemperatur wurde sowohl in die Pufferflasche, am Auslass der Quellleitung als auch in der Quellgeometrie Thermoelemente Typ K installiert.

### **Messung der Freisetzungsrates**

Mit einer Frequenz von 1 Hz zeichnete die Waage den Massenverlust während der Versuche auf, aus dem nach Umformung die mittlere Freisetzungsrates gebildet werden konnte. Die Waage besaß eine Ablesegenauigkeit von 10 g. Da sowohl Puffer- wie Stickstoffflasche auf der Waage positioniert wurden, entspricht der Massenverlust gerade der freigesetzten Propanmasse.

### **Konzentrationsmessung**

Für die Konzentrationsmessung von Propan in Luft wurde auf die sich in den kleinmaßstäblichen Versuchen bewährte Sensorik der Dräger PIR 7000 zurückgegriffen. Die robuste Ausführung ermöglicht den Einsatz unter den erwartbar härteren Umweltbedingungen des Großversuchsstands (vgl. [8]). Die Sensoren wurden zudem um weitere des gleichen Typs ergänzt, so dass in Summe bis zu 20 Sensoren für die Untersuchungen im Originalmaßstab zur Verfügung standen. Die Sensoren wurden zweckmäßig auf dem Boden des Ausbreitungsgebietes positioniert. Da die Sensoren sich diesmal direkt im Ausbreitungsgebiet befanden, gelangt das Propan bereits passiv mit der Luftströmung in die Messstrecke. Es konnte demzufolge auf die Flowcell verzichtet und die

aufwendige Installation einer aktiven Absaugung vermieden werden. Im Sensorgrundzustand stand für die Messung dementsprechend wieder die gesamte Messstrecke des Sensorkopfes zur Verfügung. Dies wirkt sich einschränkend auf den Sensormessbereich aus. So konnten in dieser Konfiguration nur noch Konzentrationen bis maximal 6,2 Vol-% messtechnisch erfasst werden. Da der Maßstabsvergleich gleichzeitig mit Blick auf die gesamte freigesetzte Masse pro Versuch auf Konstellationen mit geringen Massenströmen beschränkt blieb, konnte der verbliebene Messbereich aber als ausreichend für die Messaufgabe eingestuft werden. Die Sensoren wurden in Bezug zur Quelle maßstäblich an identischen Positionen angeordnet wie im Modellversuchsstand. Die Sensorik wurde an einem CAN-Bus betrieben, der einerseits die Spannungsversorgung der Sensoren sicherstellte, andererseits die Messdaten in Echtzeit in die Messwarte zum zentralen Messrechner übertrug.

### **Temperatur- und Feuchtemessung**

Über die gesamte Versuchskampagne wurden die Parameter Temperatur- und Feuchte innerhalb der Versuchsgeometrie mit dem mobilen Datalogger des Typs *Testo 174H*, welcher sich an der Position des zweiten USAM befand, aufgezeichnet.

### **Periphere, Hilfsaufbauten und Messtechnik**

Zur größtmöglichen Vermeidung effektiver Zündquellen wurde darauf geachtet, im direkten Ausbreitungsgebiet nur technische Geräte mit Kleinspannung von höchstens 12 V zu betreiben. Für die Geräte mit höherer Spannung wie Netzspannung wurde außerhalb seitlich direkt an der Tunnelgeometrie temporär ein Unterstand (Abbildung 4-1 Pos. 8) errichtet, in dem gleichzeitig die elektro-pneumatische Umschalt- und Versorgungseinrichtung zum Betätigen der Quellventile vor dem Wetter geschützt untergebracht werden konnte.

### **Überwachung**

Zur permanenten Überwachung im Nahbereich der Quelle sowie der Waagenanzeige wurden USB-Kameras installiert. Eine vollständige Übersicht über die Vorgänge in der Versuchsumgebung lieferte die im Tunnelfirst installierte Video-Kamera des Typs *Axis Q1755-E*. Jeder Ausbreitungsvorgang wurde zudem mit Videokameras des Typs *GoPro HERO6* dokumentiert.

### **Messwerterfassung**

In der Messwarte liefen alle Messsignale zentral im Messrechner zusammen. Mit der Software *DasyLAB* wurde ein Messprojekt erarbeitet, welches die Umrechnung der Spannungssignale in die einzelnen Messgrößen, eine anschauliche grafische Aufbereitung zur Überwachung sowie die Speicherung der Daten in Zeitreihen übernahm. Hiervon ausgenommen sind die Messsysteme für Waage und USAM, die über eigene Bedien- und Visualisierungssoftware verfügten.

## 4.2 Vor- und Begleituntersuchungen

### 4.2.1 Strömungsbedingungen in der Tunnelgeometrie

Eine Analyse des den Großversuchen zugrundeliegenden Strömungsfeldes ist in dem Maße, wie es für eine detaillierte Betrachtung des Ausbreitungsvorgangs wünschenswert wäre, aufgrund der geringen Anzahl zur Verfügung stehender USAM nicht möglich gewesen. Eine Charakterisierung der Strömung in ihren wesentlichen, für den maßstäblichen Vergleich notwendigen Zügen konnte mit diesen Mitteln dennoch erreicht werden.

Bereits in einem frühen Stadium zeigte sich, dass trotz der Bestrebungen und ergriffener Maßnahmen einer erhöhten Windanfälligkeit des innenliegenden Strömungsgebietes entgegenzuwirken (windgeschützte Süd-Nord-Ausrichtung der Giebel, Doppelstegplatten in den Freiräumen der Ventilatoren, Netz am Ausgang), bereits ein vergleichsweise schwacher äußerlicher Wind in der Lage war, wesentlich Einfluss auf die Strömungsbedingungen im Inneren der Geometrie zu nehmen. Anders als im Kleinversuchsstand kann deshalb in diesem Fall nicht von der Ausbildung eines quasistationären Strömungsfeldes im Modellgebiet ausgegangen werden.

Die Vermessung des Strömungsfeldes erfolgte exemplarisch in der Höhe  $z = 0,7 \text{ m}$  über dem Bodenniveau. Dazu wurde das Modellgebiet in ein horizontales Messraster mit einer Auflösung  $2,5 \text{ m} \times 2,25 \text{ m}$  unterteilt. Aufgrund der großen Anzahl von Messpositionen wurde die Strömung sequentiell für jede Querschnittsebene einzeln, beginnend bei einer Entfernung von  $5 \text{ m}$  stromab der Ventilatoren und endend am Tunnelausgang, erfasst. Die USAM wurden horizontal so angeordnet, dass sich eines der Messgeräte auf der Mittelachse befand sowie eines nahe der Tunnelwand. Die Messzeit betrug anschließend mindestens  $300 \text{ s}$  bei einer Messrate von  $25 \text{ Hz}$ . Nach Abschluss der Einzelmessung wurden die Messgeräte jeweils in die nächste Querschnittsebene stromab versetzt und die Messprozedur entsprechend erneut durchlaufen.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird anhand der Kriterien Mittelwert und Standardabweichung charakterisiert. In der Abbildung 4-3 ist jeweils der Mittelwert aus den ca.  $7500$  Momentangeschwindigkeiten für jede der Messpositionen sowie die sich daraus ergebene Standardabweichung für die Strömungsgeschwindigkeit in  $x$ -Richtung aufgetragen. Nach Abbildung 4-3 (oben) unterliegt der Mittelwert auch nach Mittelung über  $300 \text{ s}$  einer vergleichsweise starken Schwankung. Das Minimum liegt bei  $0,24 \text{ m/s}$ , das Maximum bei  $0,95 \text{ m/s}$ . Bei der Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Eigenschaften der Strömung gilt zu beachten, dass die hier aufgetragenen Werte nicht das Strömungsfeld im statistisch repräsentativen Sinne wiedergeben, sondern lediglich eine gemeinsame Darstellung von Einzelmessungen einer instationären Strömung sind. Ein Vergleich der Messwerte an unterschiedlicher Position in  $x$ -Richtung ohne Berücksichtigung der

zur jeweiligen Messzeit herrschenden äußeren Windbedingungen verbietet sich deshalb. Mit diesem Wissen erklärt sich auch die in der Abbildung auffallend, lokal erhöhte mittlere Geschwindigkeit im Bereich um  $x_E = 3b_T$  und  $y = 0,25b_T$ , bei der anders als an den anderen Messorten zum Zeitpunkt der Messung nachweislich die Längsströmung propagierende äußere Windbedingungen vorherrschten. Als ein Grund für die große Varianz der Mittelwerte ist eine zu kurz gewählte Messdauer aber ebenso nicht gänzlich auszuschließen. Die mittlere Tunnelströmungsgeschwindigkeit gemittelt aus den lokalen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten beträgt in der Messebene etwa  $\bar{u}_S = 0,5$  m/s.

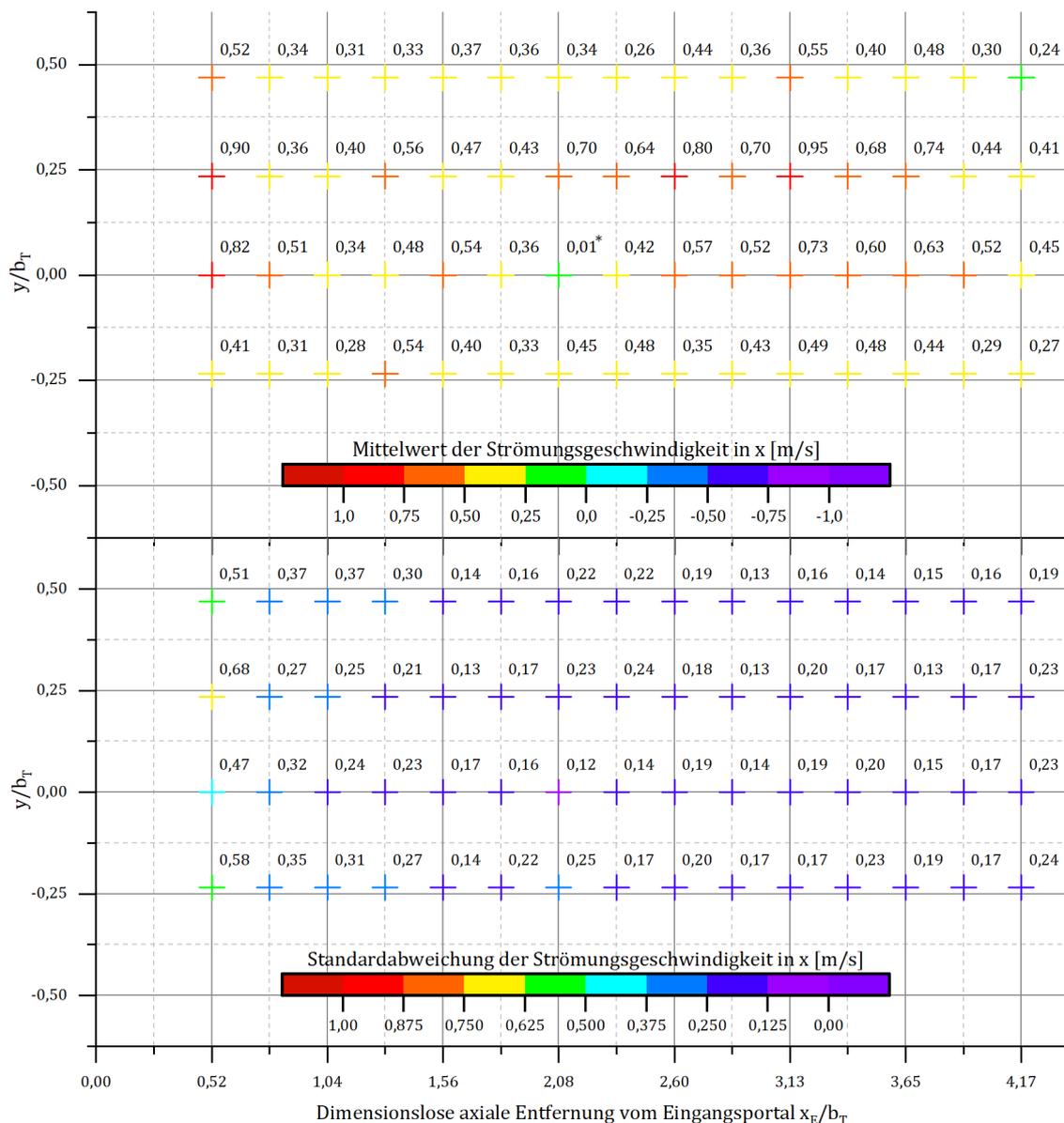


Abbildung 4-3: Mittelwert (oben) und Standardabweichung (unten) der longitudinalen Strömungsgeschwindigkeit im Großversuchsstand bei 100 % der Ventilatorleistung; \* Messposition durch Quelleinrichtung verdeckt

Während der Mittelwert über das Strömungsgebiet weitgehend uneinheitlich ist, zeichnen sich nach Abbildung 4-3 (unten) für die Standardabweichung in x-Richtung grob zwei unterschiedlich

turbulente Regime ab. Die Grenze liegt in etwa bei  $x_E/b_T = 1,3$ . Der Bereich stromauf davon ist infolge der Wurfweite der Ventilatoren durch stärkere turbulente Bewegungen geprägt. In diesem Bereich kam es zeitweise sogar zur Richtungsumkehr der Strömung im Betrieb. Im bis zum Tunnelausgang verbleibenden Bereich stromab ist die Schwankung um den Mittelwert dagegen vergleichsweise gering und verharnt trotz der diskutierten, zugleich teils großen Schwankung der Mittelwerte auf einem näherungsweise einheitlichen Niveau. Im Vergleich zu den Untersuchungen von *Schmölzer* liegen die absoluten Schwankungsbewegungen um einen Faktor 2 bis 4 höher (vgl. [88]).

In Anhang A7 sind die Ergebnisse der verbleibenden, zur x-Richtung orthogonalen Richtungen aufgetragen. Ein beständiger, gerichteter Impulstransport besteht in jene Richtungen nicht. Jegliche Bewegungen sind turbulenzbedingt.

#### 4.2.2 Freisetzungskarakteristik der Quelle

Die Waage gibt sekundlich die auf ihr befindliche Masse aus, die im Messrechner aufgezeichnet wurde. Der Gradient der Masse entspricht der momentanen Freisetzungsrate. Diese ist in Abbildung 4-4 über den Versuch VO2019-01-09 aufgetragen.

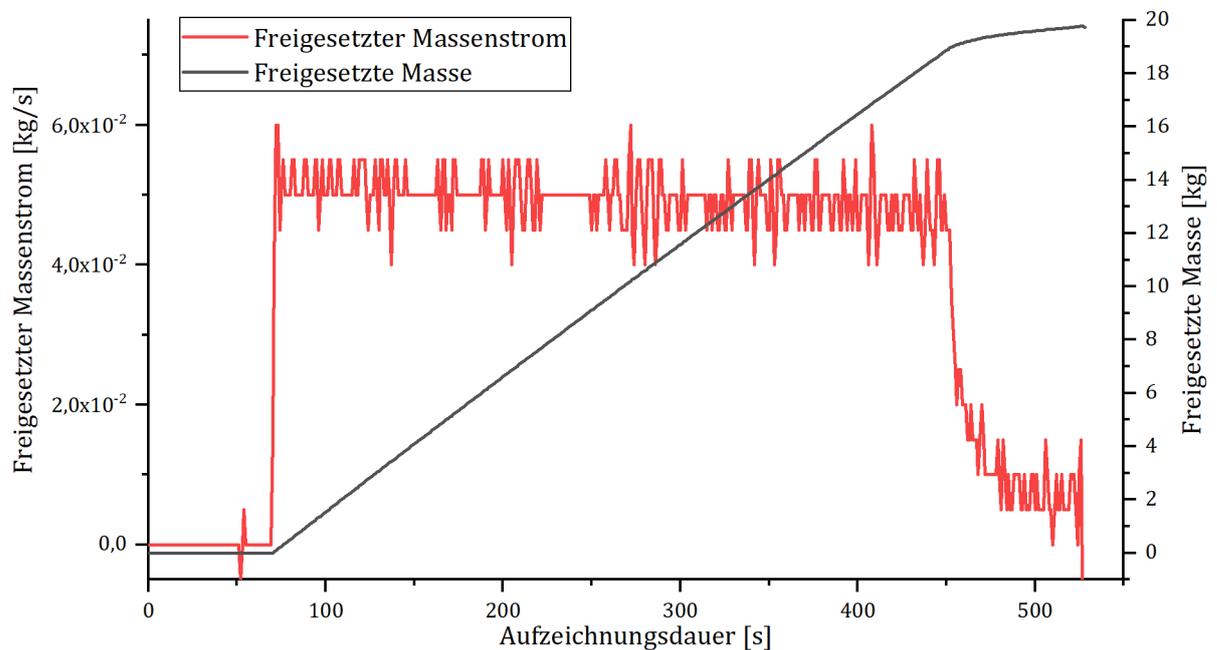


Abbildung 4-4: Entwicklung der momentanen Freisetzungsrates über die Versuchsdauer bei Großversuch VO2019-01-09 (mittlere Freisetzungsrates von 49,6 g/s über angenommenen Bereich annähernd konstanter Freisetzungsrates von ca. 380 s)

Bei  $t = 71$  s öffnet das Freigabeventil. Die Freisetzungsrates springt daraufhin schlagartig auf einen Strom von ca. 50 g/s und verharnt in der Folge über einen Zeitraum von etwa 380 s auf diesem Niveau bei einer Schwankungsbreite von  $\pm 10$  g/s. Erst zum Zeitpunkt, da der Flüssigkeitsspiegel im Speichervolumen auf die Höhe des Rohranschlusses abgesunken ist, fällt der Massenstrom –

dann rapide – auf etwa 10 g/s ab. Die Quelle erfüllte damit die gestellte Forderung nach einer konstanten Freisetzungsrates über die angepeilte Versuchsdauer nahezu vollends.

### 4.2.3 Bestimmung des Flüssiganteils

Bei der Freisetzung von Propan aus der Flüssigphase verdampft spontan nur ein Teil der freigesetzten Gesamtmenge. Ein Teil flüssigen Propans verbleibt zunächst am Ort der Freisetzung zurück. Für den maßstäblichen Vergleich ist dieser zu bestimmen und nachträglich vom Gesamtmassenstrom abzuziehen. Zur Bestimmung des spontan verdampfenden Flash-Anteils überhitzter Flüssigkeiten wurden in der Vergangenheit Spray-Modelle entwickelt (siehe bspw. [80]). Unter den spezifischen Randbedingungen der Freisetzung in die individuell gestaltete Quellgeometrie sind diese aber nicht anwendbar bzw. die Ergebnisse nicht belastbar. Es verbleibt nur die Möglichkeit einer experimentellen Bestimmung unmittelbar am Anwendungsfall.

Dafür wurde in ausgewählten originalmaßstäblichen Versuchen eine zweite Waage gleichen Typs mit der Auflösung 1 g unter die Auffangwanne der Quellgeometrie positioniert. So war es möglich, die Masse des abtropfenden Flüssigpropans über die Versuchsdauer zu dokumentieren. Der sich anhand dessen ergebende Flüssiganteil am Gesamtmassenstrom ist in Abbildung 4-5 exemplarisch ebenfalls für den Versuch VO2019-01-09 dargestellt.

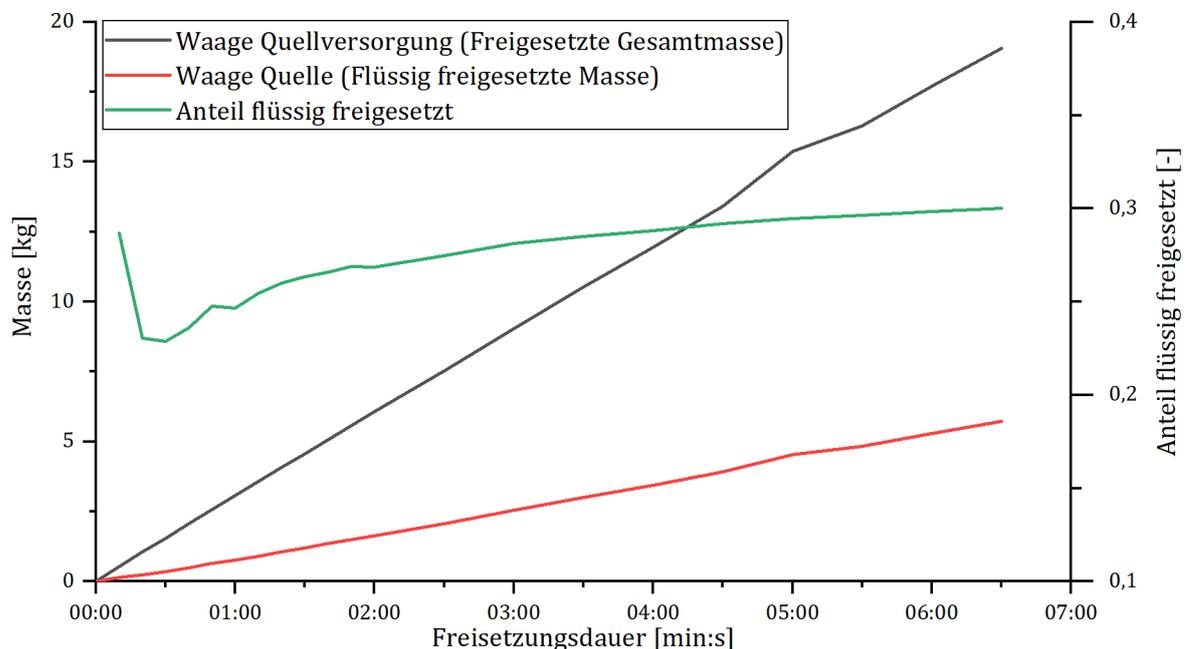


Abbildung 4-5: Entwicklung der freigesetzten Gesamtmasse, der flüssig freigesetzten Masse sowie des daraus berechneten Flüssiganteils am Gesamtmassenstrom über die Freisetzungsdauer im Großversuch VO2019-01-09 (Flaschenstützdruck von 6 bar, Umgebungstemperatur von 3 °C)

Nach einem anfänglichen Flüssiganteil von knapp 30 % fällt der Wert schnell auf das Minimum von 22 % ab. Mit fortschreitender Versuchsdauer nähert sich die Kurve dann wieder einem Flüssig-

siganteil von 30 %. Dieser Wert steht im Einklang mit den Ergebnissen impulsloser Propanfreisetzungen anderer Experimentatoren (z. B. in [56]). Der erhöhte Startwert deutet hingegen auf ein Artefakt in der Messung hin, der vermutlich weniger dem flüssigen Anteil entspricht, als vielmehr von einem initialen Freisetzungsimpuls auf die Waage herrührt. Der in Abbildung 4-5 gezeigte Verlauf ist repräsentativ für alle Versuche und lässt sich erklären mit der kontinuierlichen Abnahme der für den Phasenübergang in der unmittelbaren Quellumgebung zur Verfügung stehenden Energie. Entsprechend wird bei der Auswertung pauschal ein um 30 % zum Gesamtmassestrom verminderter Massestrom als gasförmig angenommen.

### **4.3 Beschränkungen des Großversuchsstandes**

Die Voruntersuchungen machen deutlich, dass trotz des hohen Aufwands der reale Versuchsstand in einigen wesentlichen Merkmalen von den bei Auslegung gestellten Anforderungen abweicht, was seinen Anwendungsbereich einschränkt. Hierauf war bei Versuchsplanung und -umsetzung in geeigneter Art und Weise zu reagieren. Im Einzelnen wurde Folgendes festgestellt sowie festgelegt:

1. Die angestrebte Unabhängigkeit von den äußeren Windbedingungen konnte nur in ungenügendem Maße erreicht werden. Die Strömung reagierte sehr sensitiv auf den äußerlichen Wind. Als Konsequenz hiervon wurde beschlossen, alle Ausbreitungsversuche nur an weitestgehend windstillen Tagen vorzunehmen. Zur Abschätzung geeigneter Windbedingungen wurde sich an den kontinuierlichen Messdaten des Systems aus Schalenkreuzanemometer und Windgeber orientiert.
2. Die Strömung im Versuchsgebiet erreicht bei maximaler Ventilatorleistung im Mittel nur etwa die Hälfte der anvisierten Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s. Für die Betrachtungen zur Skalierbarkeit wird deshalb pauschal von einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s ausgegangen.
3. Der gesamte ventilatornahe Bereich scheint aufgrund der hohen turbulenten Fluktuationen und anteiligen Umkehr der Strömungsrichtung nur bedingt geeignet als Ort der Freisetzung. Wird der Ort der Freisetzung jedoch zu weit stromab in den hinteren, gleichmäßig turbulenzarmen Bereich versetzt, befinden sich die quellfernten Messpunkte außerhalb der Umschließung und können nicht mehr realisiert werden. Hier galt es einen Kompromiss zwischen beiden Extremen zu finden. Die letztlich in Abhängigkeit der Quellposition realisierten Messstellen sind in Anhang A9 gegeben.
4. Mit der entworfenen Quellgeometrie kann die Freisetzungsrates über weite Strecken konstant gehalten werden. In Anbetracht der festgelegten Mindestdauer pro Versuch,

dem Speichervolumen des Quellgefäßes sowie einem Flüssiganteil von 30 % wird dagegen nur eine gasförmige Freisetzungsrates von um 30 g/s als unter diesen Bedingungen realistisch umsetzbar im Großversuch angesehen.

Alle genannten Einschränkungen wären nur unter erheblichem Aufwand und mit massiven Investitionen in die Versuchsstandinfrastruktur und die messtechnische Ausrüstung zu beheben gewesen.

#### **4.4 Untersuchung der Verifizierungskonfigurationen im Modellmaßstab**

Die Skalierbarkeit des Problems soll im Rahmen der Arbeit anhand von zwei Konfigurationen überprüft werden. Als erstes wird der einfachste Fall des hindernisfreien Modelltunnels betrachtet. Ferner bietet sich die Anordnung mit dem Würfel in direkter luvseitiger Quellnähe ( $x_{iH} = 0,25b_T$ ) mit ihrem im Kleinversuchsstand beobachteten, klar vom hindernisfreien Fall abgrenzbaren longitudinalen Konzentrationsverlauf an. Aufgrund der Restriktionen des Großversuchsstands werden die Versuche bei der Betriebsparameterkonstellation  $U_{ccT} = 0,5/\lambda_U \frac{m}{s}$  mit  $\dot{m}_Q = 0,025/\lambda_m \frac{kg}{s}$  vorgenommen, welche allerdings nicht Bestandteil des ursprünglichen Versuchsumfangs im Modellmaßstab war und somit zunächst nachträglich umgesetzt werden musste. Bei dieser Einstellung ist zu beachten, dass entsprechend der Skalierungsfaktoren bei der praktischen Durchführung die Strömungsgeschwindigkeit im Modelltunnel so niedrig zu wählen ist, dass die Reynoldszahl im hindernisfreien Modelltunnel bei lediglich 7000 sowie bei der Hindernisanordnung die Körperreynoldszahl am Würfelhindernis bereits im Bereich laminarer Umströmung liegt, was sich für den späteren Vergleich der Ergebnisse als problematisch erweisen könnte.

Abbildung 4-6 zeigt die aus jeweils einer Menge identischer Einzelversuche gemittelten Konzentrationsverläufe für beide Verifikationskonfigurationen. Beide Konfigurationen weisen entsprechend die gleichen Charakteristiken auf wie bei höheren Freisetzungsrates und Strömungsgeschwindigkeiten. Die mit der Einführung des Hindernisses einhergehende deutliche Abflachung des Konzentrationsverlaufs tritt eindrücklich hervor. Zudem liegen alle Konzentrationen quantitativ wie erhofft im Messbereich der in der Standardausführung betriebenen Gastransmitter im Großversuchsstand von kleiner 6 Vol-%. Ein besonderer, durch die geringe Reynoldszahl hervorgerufener Einfluss ist bis hierhin nicht erkennbar. Beide Konzentrationsverläufe zusammen bilden nach vorläufigem Kenntnisstand damit eine angemessene Vergleichsgrundlage für die im Folgenden thematisierten Großversuche.

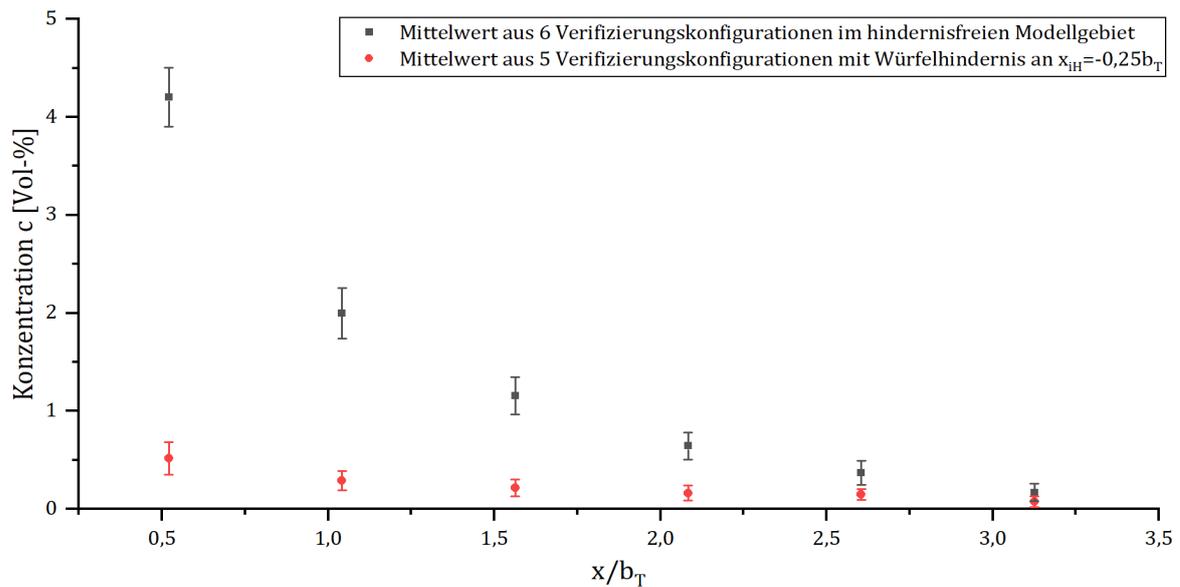


Abbildung 4-6: longitudinaler Konzentrationsverlauf im Kleinversuchsstand bei  $U_{ccT} = 0,5/\lambda_U \frac{m}{s}$  und  $\dot{m}_Q = 25/\lambda_m \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$  für a) hindernisfreies Modellgebiet und b) Modellgebiet mit Würfelhindernis an  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromauf der Quelle

## 4.5 Messkampagne im Großversuchsstand

In diesem Unterkapitel werden die primär zur Verifikation der Skalierbarkeit im Zeitraum von Dezember 2018 bis Januar 2019 durchgeführten großmaßstäblichen Versuche dargelegt und diskutiert.

### 4.5.1 Versuchsumfang

Die Messkampagne im Großversuchsstand umfasste insgesamt 18 Einzelversuche. In beiden Verifikationskonfigurationen wurden die Versuche zur statistischen Absicherung der Ergebnisse mehrfach wiederholt, wobei soweit wie praktisch möglich auf gleiche Strömungsrandbedingungen geachtet wurde. Vor jedem Versuch war das Puffergefäß mit einer ausreichenden Menge Propan zu füllen. Die hierzu etablierte Füllprozedur ist im Anhang A8 beschrieben. In Tabelle 4-1 sind alle gültigen Versuche der Messkampagne mit ihren wesentlichen Merkmalen aufgeführt. Drei Versuche mussten aufgrund ihres individuellen Geschehens als ungültig eingestuft werden, die bei der Auswertung daher unberücksichtigt bleiben. Die Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte während der Messkampagne innerhalb der Versuchsgeometrie sind in Anhang A17 abgebildet.

Wie sich aus der Tabelle ergibt, variierte der Freisetzungsort in x-Richtung über die Versuchskampagne. Ausgehend von einer Position im turbulenzarmen Bereich in den ersten Versuchen, womit jedoch auf die Messentfernungen  $x = 2,6b_T$  und  $x = 3,125b_T$  verzichtet werden musste, wurde im Laufe der Kampagne in einigen Versuchen die Quellposition um  $x = 1,04b_T$  ( $\cong 10\text{ m}$ ) stromauf versetzt, um eben jene beiden Messpositionen realisieren zu können. Die mit dieser im

ersten Moment gering erscheinenden Anpassung unbeabsichtigt verbundenen Änderungen im longitudinalen Konzentrationsverlauf werden in Abschnitt 4.5.3 diskutiert.

Tabelle 4-1: Gültige Versuche der Messkampagne im Großversuchsstand (vollständige Angaben in Anhang A16)

<b>Versuchs-Nr.</b>	<b>Freisetzungsdauer [min:s]</b>	<b><math>\dot{m}_{Q,gas}</math> [g/s]</b>	<b><math>p_{stütz}</math> [bar]</b>	<b>Axiale Quellentfernung vom Eingangsport</b>	<b>Hindernis bei <math>x_{tH} = 0,25b_T</math> vorhanden?</b>	<b>Messstellennordnung</b>
VO2018-12-11	06:00	21,19	5,5	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 1
VO2018-12-12_1	06:00	21,19	5,5	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 1
VO2018-12-12_2	07:00	18,83	5,5	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 1
VO2018-12-13	05:00	18,86	6	2,08b <sub>T</sub>	ja	PIR Layout 1
VO2018-12-18	05:00	28,75	6,2	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 1
VO2018-12-20	06:30	27,83	6,2	1,04b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 2
VO2019-01-09	06:30	34,10	6,2	1,04b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 2
VO2019-01-10_1	06:30	33,74	6,2	1,04b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 3
VO2019-01-10_2	09:00	27,61	6,2	1,04b <sub>T</sub>	ja	PIR Layout 3
VO2019-01-11_1	06:30	36,79	6,2	1,04b <sub>T</sub>	ja	PIR Layout 4
VO2019-01-11_2	06:00	32,28	6,2	1,04b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 4
VO2019-01-16_1	10:15	29,17	5,8	1,04b <sub>T</sub>	ja	PIR Layout 4
VO2019-01-16_2	13:30	22,73	5,8	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 5
VO2019-01-18_1	08:00	34,56	6,2	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 5
VO2019-01-18_2	08:30	28,27	6	2,08b <sub>T</sub>	nein	PIR Layout 5

Aus der Tabelle geht überdies ein Schwanken der mittleren gasförmigen Freisetzungsrates (also bereits nach Abzug des flüssigen Anteils) über die Versuchskampagne um den gewünschten Wert herum hervor. Diese Abweichungen gehen auf den Umstand zurück, dass die Freisetzungsrates nur indirekt und im Vorfeld über die Wahl des Stützdrucks im Puffergefäß eingestellt werden konnte und zudem abhängig von der Umgebungstemperatur Schwankungen unterliegt.

Laut der Daten zur kombinierten Feuchte- und Temperaturmessung (siehe Anhang A17) herrschte im Versuchsgebiet über weite Strecken der Messkampagne eine hohe bis sehr hohe Luftfeuchtigkeit bei Temperaturen, die im Durchschnitt und insbesondere zu den Versuchszeiten leicht oberhalb des Gefrierpunktes lagen. Der Wind war währenddessen mit Geschwindigkeiten von  $\leq 4 \text{ m/s}$  durchweg schwach ausgeprägt und die mittlere Windrichtung wich größtenteils nur in geringem Maße von der gewünschten axialen Strömungsrichtung im Versuchsgebiet ab.

#### **4.5.2 Allgemeine Beobachtungen zur Ausbreitung im Realmaßstab**

Die Freisetzung des flüssigen Propans ist aufgrund seiner hohen spezifischen Verdampfungsenthalpie mit einer starken Abkühlung der Umgebung verbunden. Dabei kondensiert die Luftfeuchtigkeit zu feinen Flüssigkeitstropfen aus; es bildet sich ein Aerosol, welches makroskopisch als Nebel wahrnehmbar ist. Mit der visuellen Bekundung der Entwicklung und des zeitlichen Verhaltens der Aerosolwolke besteht anders als im Kleinversuchsstand nunmehr neben der Konzentrationsmessung eine weitere Möglichkeit, auf die Propanausbreitung zu schließen.

*Nielsen* korrelierte die Konzentration in der Wolke mit deren Sichtbarkeit in Abhängigkeit vom Taupunkt der Umgebung. Demnach ist bei einer Taupunkttemperatur von  $1^\circ\text{C}$  eine Propankonzentration von 0,8 Vol-% gerade noch sichtbar; bei  $10^\circ\text{C}$  liegt die Schwelle bei 8,2 Vol-% [78]. Die Taupunkttemperatur lässt sich aus der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ermitteln, die beide während der Messkampagne aufgezeichnet wurden (siehe Anhang A17). Die angegebene Spanne ist jedoch zu groß, um hieran im Detail die Ausmaße des explosionsfähigen Bereiches in den Versuchen zu bemessen. Die Korrelation deckt sich aber mit der Beobachtung von deutlich kleineren Kondensationsbereichen an den wärmeren Versuchstagen und bei geringerer relativer Luftfeuchtigkeit.

Die Videoaufzeichnungen (siehe die exemplarischen Bildsequenzen in Abbildung 4-7) zeigen eine Ausbreitung, die ausschließlich in der bodennächsten Schicht stattfindet. Ein geringes vertikales Aufwallen, welches an das zyklische Entstehen und Abrollen von Frontwirbeln erinnert, ist beschränkt auf die unmittelbare Quellnähe. Dem optischen Eindruck nach verlässt das Propan die Quellgeometrie wie beabsichtigt radial allseits und gleichmäßig mit einem geringen Impuls. Dem-

nach ist die Annahme eines impulsfreien Austritts gerechtfertigt. Nach Freisetzung kommt es unter der geringen Anströmung zu einer zügigen allseitigen Verbreitung der Wolke, die lateral bis an die Tunnelwände reicht.

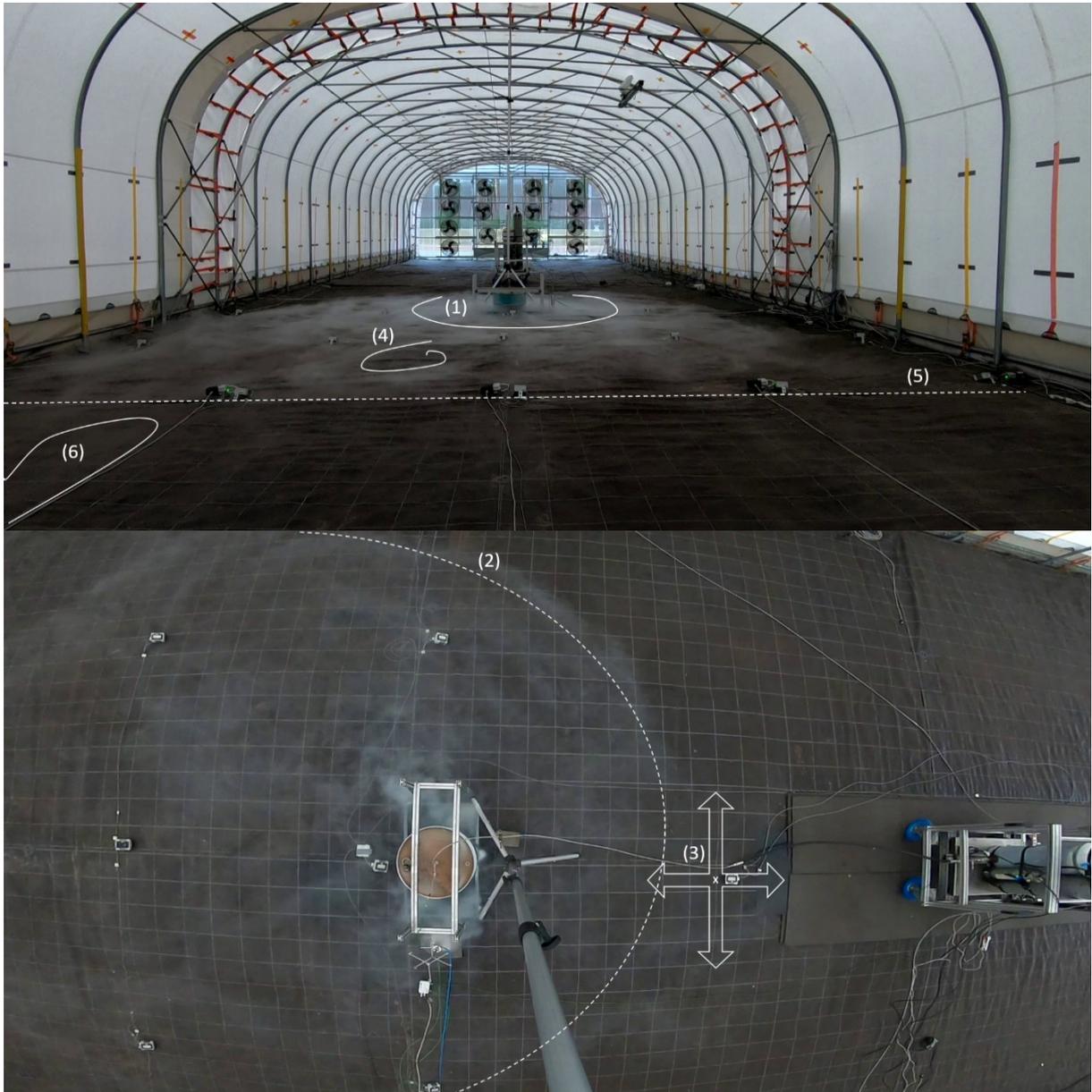


Abbildung 4-7: Momentaufnahmen der Propanausbreitung im hindernisfreien Großversuchs VO2019-01-16\_2 von Stromab aus gesehen (obere Abbildung) sowie aus der Vogelperspektive (untere Abbildung); (1) Aufwallbereich des Nebels, (2) Parabelförmige Grenze des Nebels stromauf, (3) Ort maximaler axialer Ausbreitung des Nebels stromauf, (4) Wirkungsbereich von Wirbel, (5) ungefähre Grenze kompakten Nebels stromab, (6) abgelöste Nebelschwaden stromab; regelmäßiges Raster aus weißen Linien am Boden mit Abstand 0,25 m x 0,25 m

Stromauf der Quelle stoppt die Ausbreitung der sichtbaren Wolke nach kurzem Stromaufwandern. Der Nebel in diesem Bereich ist relativ dicht, so dass sich der Bereich, in dem Nebel vorhanden ist, von dem restlichen Bereich zumeist deutlich abgrenzt. Die Abgrenzung stromauf folgt dabei, wie in dem Modell von *Britter & McQuaid* (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) prognostiziert, einer Para-

belform, wobei dieser Zustand nur über kurze Zeiträume stabil ist. Über die gesamte Versuchsdauer betrachtet, alternieren Form und Lage der Grenzfläche, welche anteilig auch in ihrer Einheit zerschnitten wird, wobei sich der Ort der maximalen Ausbreitung stromauf dagegen axial stets nur sehr wenig verschiebt. Ein vertikales Aufrollen und damit Lufteinmischen scheint in diesem Bereich ausgeprägt zu sein.

Stromab der Quelle fehlt eine solche mehr oder weniger eindeutige Abgrenzung. Vielmehr wird der Nebel in Richtung der Luftströmung – nach grober Abschätzung leicht verzögert – fortgetragen. Zeitweilig werden lokale Bereiche in eine horizontale Drehbewegung versetzt und damit die Einheit des Nebels aufgebrochen, was auf das Wirken größerskaliger Luftwirbel in der Wolke schließen lässt. Axialsymmetrische Verhältnisse um die Quelle, wie sie unter idealen Bedingungen zu erwarten wären, liegen nur in wenigen Zeitabschnitten vor. Der Kernbereich des kompakten flächigen Nebels endet stromab im Mittel nach etwa 5 m ( $x = 0,52b_T$ ). Von diesem lösen sich dann Teilbereiche ab, die in Schwaden weiter stromab wandern.

In den Versuchen mit dem Würfelhindernis zeigte sich rein visuell keine merkliche Abweichung von dem beschriebenen Ausbreitungsverhalten.

### 4.5.3 Auswertung der longitudinalen Konzentrationsverteilung

Das soeben beschriebene, durch lokale Instabilitäten geprägte, dynamische Verhalten der Wolke äußert sich in einer merklich größeren Schwankung der lokalen Konzentration über die Versuchsdauer, als dies im Modellversuchsstand bisweilen auch durch die entsprechend der Skalierung um das 3,5fache schneller ablaufenden Vorgänge detektiert werden konnte (Abbildung 4-8; vgl. dazu Abbildung 3-12).

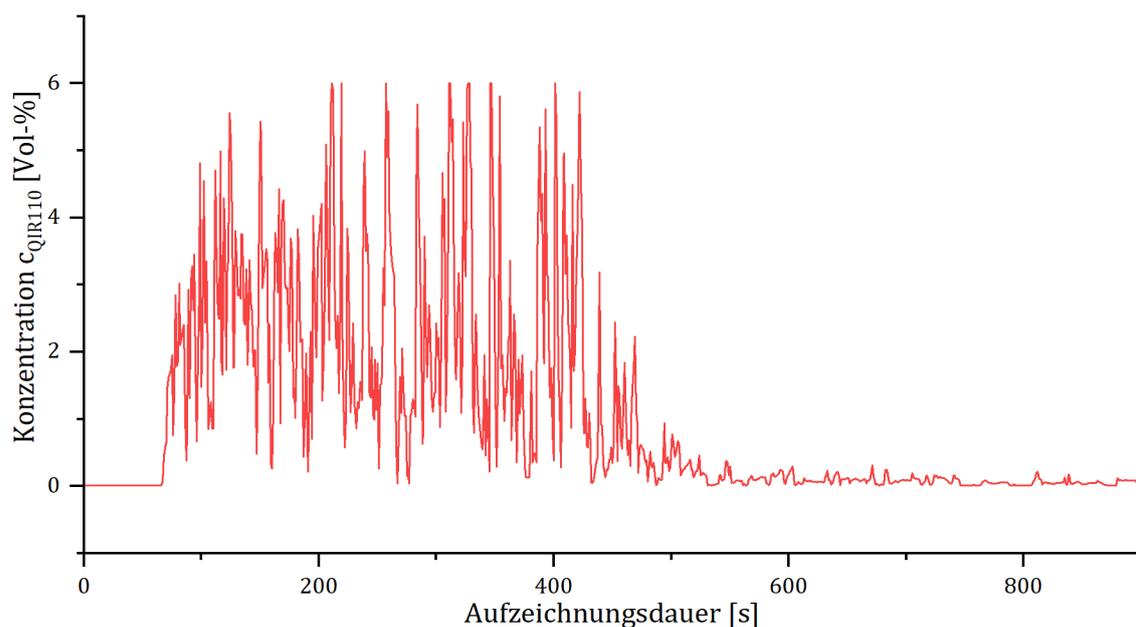


Abbildung 4-8: Exemplarischer Verlauf der Konzentration über die Aufzeichnungsdauer im Großversuch am Beispiel des Sensors QIR110 in Versuch V2018-12-12\_1

Das gleichzeitig nur begrenzte Vorhandensein eines quasistationären Zustands bereitet Probleme bei der Bildung eines repräsentativen Mittelwerts. Lage und Breite des Mittelungsintervalls sind nun nicht mehr versuchsübergreifend definierbar, sondern für jeden Sensor individuell und bei jedem Versuch neu zu bestimmen. Freisetzungsbeginn und Ende sind zudem keine geeigneten Intervallgrenzen, da die axiale Lauflänge der Wolke bis zum Sensor in diesem Falle unberücksichtigt bliebe. Erst nach Begutachtung der Datenreihe ist die sinnvolle Wahl der Grenzen möglich, womit die Mittelwertbildung aber gleichzeitig jedes Mal einer gewissen Subjektivität unterliegt, die nur durch eine ausreichende Versuchsdauer minimiert werden kann.

In Abbildung 4-9 sind die nach Mittelung erhaltenen Konzentrationen für die gültigen Versuche bei hindernisfreier Konfiguration und begrenzt auf die axialen Messpunkte aufgetragen. Die Ergebnisse für alle übrigen Messpositionen können in den Versuchsdatenübersichten in Anhang A16 nachgeschlagen werden. Bei der Auswertung gilt zu beachten, dass bei den hohen Konzentrationen am quellnächsten Messpunkt ( $x_{QR110} = 0,52b_T$ ) trotz Vorauswahl einer für die Gasstrahler geeigneten Parametereinstellung bedingt durch die festgestellte starke Fluktuation des Messwertes kurzzeitig in den Versuchen VO2018-12-18, VO2019-01-16\_2, VO2019-01-18\_1 und VO2019-01-18\_2 der Messbereichsendwert erreicht bzw. dabei mutmaßlich überschritten wurde, was messtechnisch nicht weiter aufgelöst werden kann und dementsprechend in den genannten Versuchen der jeweils errechnete Konzentrationsmittelwert für jenen Messpunkt tendenziell geringer als die wahre örtliche Konzentration ist. Eine genauere Analyse ist aufgrund der Unkenntnis des wahren Verlaufs in diesem Bereich nicht möglich.

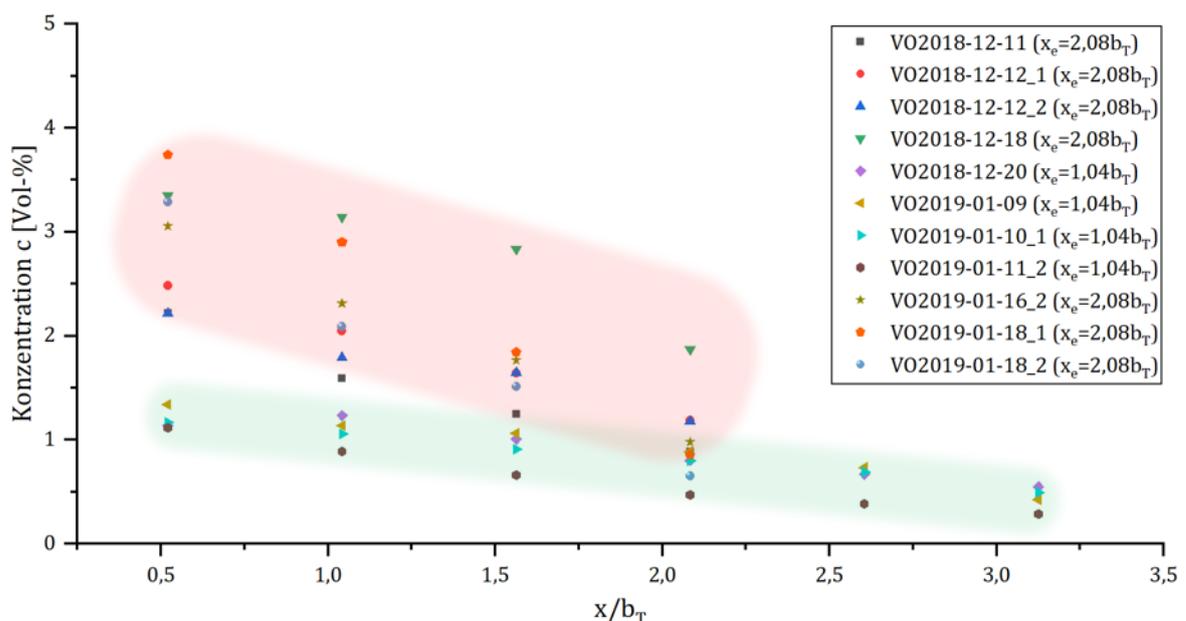


Abbildung 4-9: Longitudinale Konzentrationsverläufe für die Großversuche bei hindernisfreiem Versuchsgelände; oberer Bereich = rot markiert, unterer Bereich = grün markiert

Generell nimmt die Konzentration laut Abbildung 4-9 mit Quellentfernung ab, wobei gleichwohl deutliche Unterschiede in der Höhe und der longitudinalen Abnahme der Konzentration bestehen. Grob können im Diagramm mindestens zwei Wertebereiche, in denen die Konzentrationen liegen, voneinander unterschieden werden. Der obere Bereich ist geprägt durch eine breite Spanne und vergleichsweise hohe quellnahe Konzentrationen von 2 Vol-% bis 4 Vol-%, die mit Quellentfernung rasch abnehmen. Eine positive Korrelation zwischen Konzentration und tatsächlicher Freisetzungsrates deutet sich mit Ausnahme von Versuch VO2018-12-18 an, wobei jener die geringste Versuchsdauer aller Versuche aufwies. Im unteren Bereich liegen die Konzentrationen bereits quellnah nur im Bereich von geringfügig über 1 Vol-%, die Konzentrationen sinken bis zur Quellentfernung  $x = 2,08b_T$  anschließend nur moderat um 0,5 Vol-% bei einer deutlich geringeren Spreizung der Messwerte gegenüber dem anderen Bereich ab.

Berücksichtigt man nun die Quellposition  $x_E$ , fällt auf, dass letztgenannter Bereich durch all jene Versuche gebildet wird, bei denen die Freisetzung an weiter stromauf liegender Position erfolgte. Letztlich erinnert dieser Konzentrationsverlauf in Höhe und Charakteristik eher an den beim Würfel zu erwartenden; was im Folgenden noch zu erörtern ist.

Nach Abbildung 4-10 bewegen sich die Konzentrationen bei Anwesenheit des Würfels, diesmal unabhängig von der Quellposition, durchweg auf einem geringen Konzentrationsniveau. Von einem verdünnungsfördernden Effekt durch den quellnahen Würfel bei der gewählten Betriebsparametereinstellung kann demnach auch im Originalmaßstab ausgegangen werden. Erstaunlich ist, dass dabei die Charakteristik der Konzentrationsverläufe der Versuche mit stromauf vorgezogener Quelle aber ohne Hindernis aus der vorherigen Abbildung sich vielmehr harmonisch in die Kurvenverläufe der vorliegenden Abbildung einfügen würden. Eine mögliche Erklärung für diesen unerwarteten Befund können die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen zu den Strömungsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.2.1) liefern. Dabei fiel auf, dass mit Annäherung an die Ventilatoren die Standardabweichung der Strömungsgeschwindigkeit zunahm. Versuchsstandbedingt scheinen damit die am vorgezogenen Quellort durch die Ventilatoren verursachten, lokal stärkeren turbulenten Bewegungen der Strömung in ähnlicher Weise verdünnungsfördernd zu wirken wie ein bei turbulenzärmerer Quellungströmung stromauf quellnah eingebrachter Würfel. Gleichzeitig scheinen die turbulenten Verhältnisse um die Quelle so ausgeprägt zu sein, dass ein unter diesen Bedingungen noch zusätzlich eingebrachter Würfel (vgl. bspw. VO2019-01-09 mit VO2019-01-11\_1) aber keinen zusätzlichen verdünnungsfördernden Effekt mehr mit sich bringt.

Ein aus sicherheitstechnischer Sicht relevanter, allgemeiner Aspekt, der Bezug nehmend auf die visuellen Beobachtungen zur Nebelbildung aus dem vorherigen Abschnitt auffällt, ist, dass der durch Nebelbildung je nach Umgebungsbedingung sichtbar gewordene Bereich bisweilen nur ei-

nen Ausschnitt aus dem Bereich abdeckt, in dem nach Messung tatsächlich signifikante Propankonzentrationen und temporär eine explosionsfähige Atmosphäre vorliegen. Insbesondere für die praxisnahen Überlegungen zum Vorgehen und dem Umgang mit derartigen Situationen (von Rettungskräften, Feuerwehren, Beteiligten etc.) leitet sich hieraus die wichtige Erkenntnis ab, dass der Nebel zwar ein Indiz für das Vorhandensein aber bei weitem kein hinreichendes Kriterium zur Bestimmung des Gefahrenbereiches darstellt.

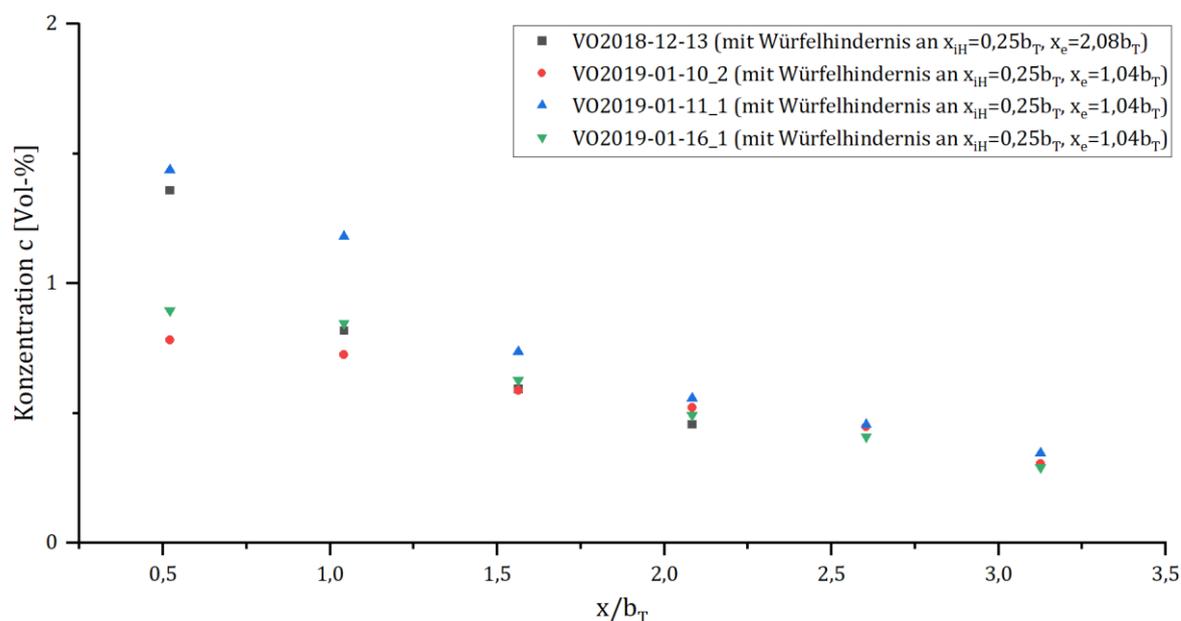


Abbildung 4-10: Longitudinale Konzentrationsverläufe für die Großversuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromauf der Quelle

## 4.6 Maßstäblicher Vergleich

Der maßstäbliche Vergleich der Konzentrationsverteilung wird wegen der im Modelmaßstab geringeren Anzahl vorhandener Messpositionen im Folgenden vorrangig anhand der Messpunkte auf der x-Achse vorgenommen, ungeachtet der Tatsache, dass in den Großversuchen die Maximalkonzentrationen in gleicher Entfernung vereinzelt nicht mittig auftraten. Für die Vergleiche wurde aus den zeitlichen Mittelwerten der Einzelversuche ein Ensemblemittelwert gebildet. Beim hindernisfreien Fall werden dabei die Ergebnisse aus den Versuchen mit vorgezogener Quelle aufgrund der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Eigenheiten nicht berücksichtigt.

### 4.6.1 Qualitativer Vergleich der gemessenen Konzentrationsverläufe

In Abbildung 4-11 sind die sich nach Ensemblemittelung an den jeweiligen Quellentfernungen ergebenden Mittelwerte samt Standardabweichung sowohl für die hindernisfreie als auch die Konfiguration mit Würfelhindernis aufgetragen. Zudem enthält die Abbildung die im Kleinversuchsstand gewonnenen Vergleichsdaten aus Abschnitt 4.4. Im Unterschied zum beobachteten expo-

nentiellen Verlauf im Modellversuchsstand scheinen die mittleren Konzentrationen im hindernisfreien Fall Abbildung 4-11 nach im Großversuchsstand eher linear abzunehmen. Folgendes gilt bei der Ableitung eines Verlaufs aus diesen Daten der Großversuche jedoch zu beachten. Erstens streuen die Einzelwerte um den Mittelwert relativ stark. Zweitens ist die Anzahl der longitudinalen Messpunkte (vier Stück) unter Beachtung ihrer Streubereiche zu gering, um gesichert von einem linearen Verlauf ausgehen zu können. Drittens ist der Ensemblemittelwert für die Entfernung  $x = 0,52b_T$ , wenn auch in vermindertem Maße, ebenso wie die geschilderten messtechnischen Artefakte der ihm für die Berechnung zu Grunde liegenden Einzelwerte systematisch verfälscht und der wahre aber unbekannt Konzentrationwert an dieser Position ist in unbekanntem Maße höher. Alle drei Aspekte zusammengenommen machen einen linear abnehmenden Verlauf umso unwahrscheinlicher. Für die hindernisbehaftete Konfiguration nehmen die mittig axialen Konzentrationen demgegenüber qualitativ einen ähnlichen Verlauf.

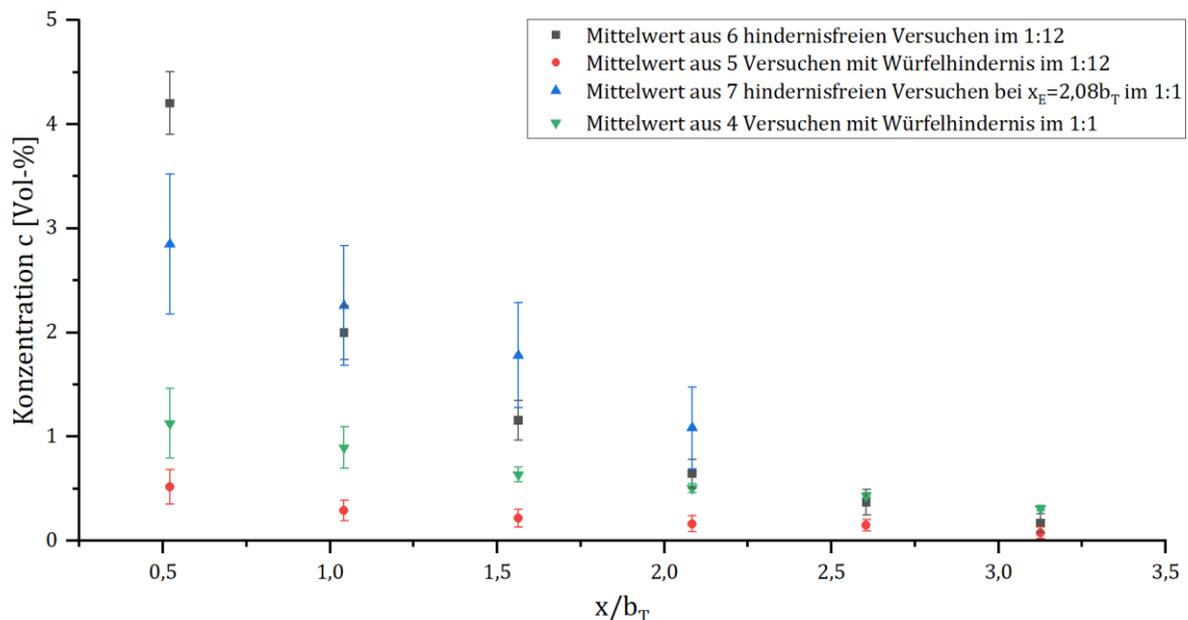


Abbildung 4-11: Maßstäblicher Vergleich der gemittelten longitudinalen Konzentrationsverläufe für Versuche im hindernisfreien Modellgebiet sowie für Versuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromauf der Quelle zwischen den Experimenten im Maßstab 1:1 und 1:12

In Abbildung 4-12 sind die Ergebnisse für die lateralen Vergleichspositionen in der Entfernung  $x = 1,5625b_T$  aufgetragen. Lateral zeigt sich im hindernisfreien Tunnel maßstabsübergreifend eine ähnliche Abnahme der Konzentrationen beiderseits der Mitte, wenngleich die Konzentrationen des Modelltunnels im Mittel im Originalmaßstab überschritten werden. Im durch das mit einem Würfelhindernis verstellten Gebiet zeigen sich derweil qualitative Unterschiede, die auf unterschiedliche Breiten beider Schwergaswolken hindeuten. Während im Modelltunnel in der gewählten Quellentfernung sich die Konzentrationen lateral bereits sehr stark ausgeglichen haben, besteht im Originalmaßstab zwar eine geringere aber weiterhin leichte Konzentrationsabnahme zu den Seiten hin.

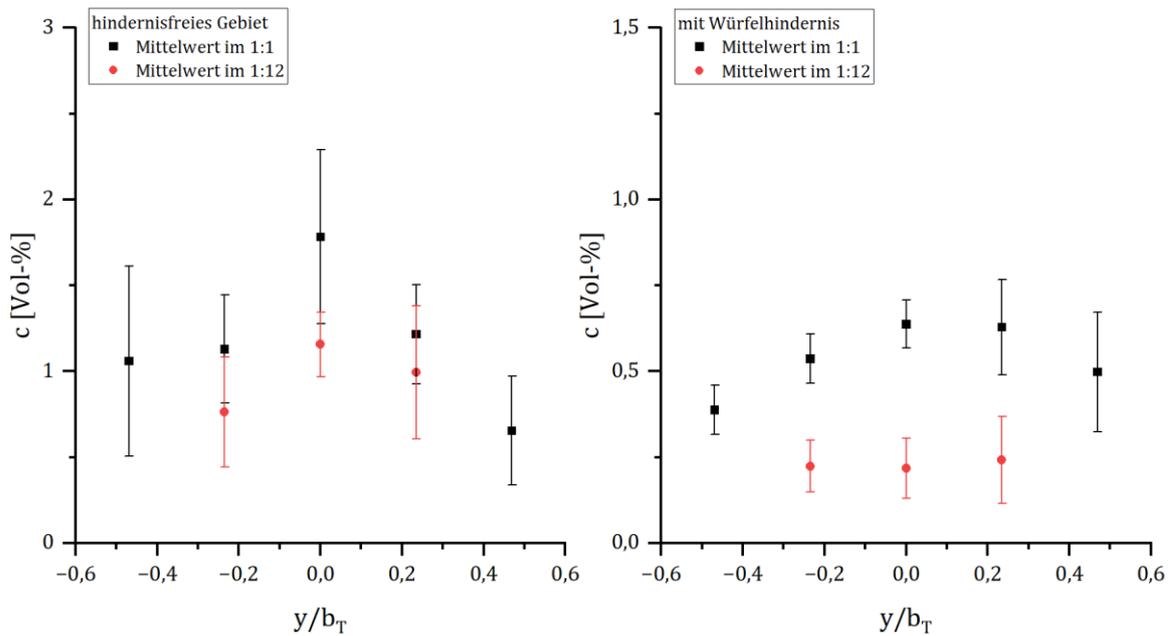


Abbildung 4-12: Maßstäblicher Vergleich der gemittelten Konzentrationen lateral bei  $x = 1,5625b_T$  für Versuche im hindernisfreien Modellgebiet (links) sowie für Versuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromauf der Quelle (rechts) zwischen den Experimenten im Maßstab 1:1 und 1:12

#### 4.6.2 Detaillierter quantitativer Vergleich

Als Grundlage eines differenzierten quantitativen Vergleichs sind die Konzentrationen in beiden Maßstäben in Abbildung 4-13 in Form von Streudiagrammen gegenübergestellt. Bei identischen Konzentrationswerten würden alle Punkte auf der dargestellten Geraden liegen.

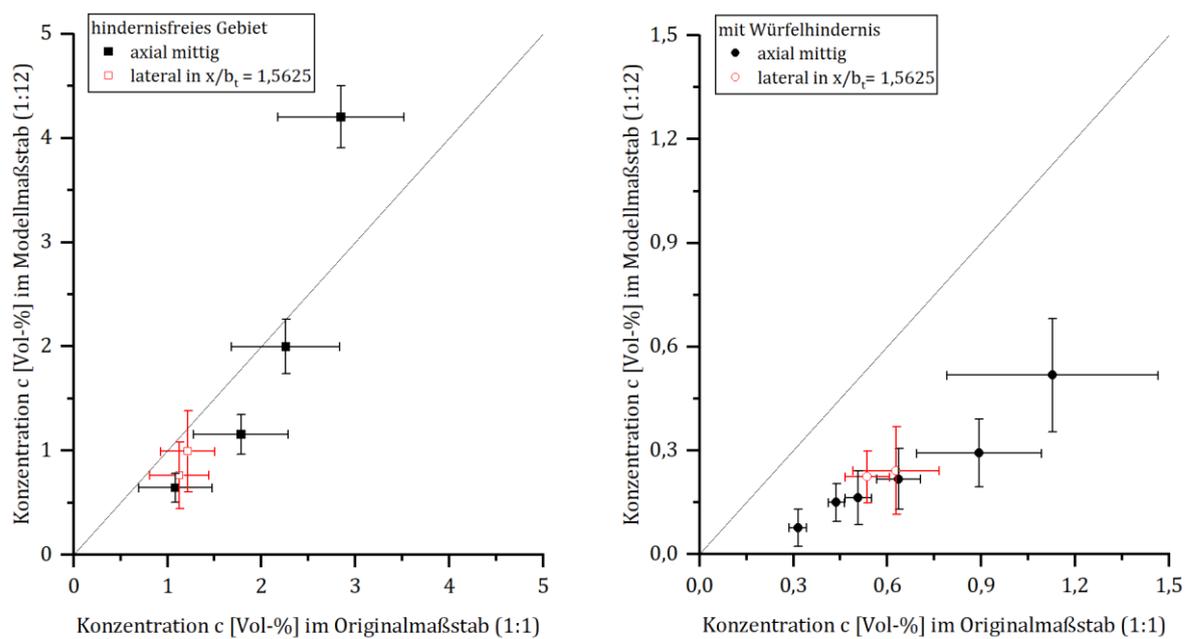


Abbildung 4-13: Streudiagramm der Konzentrationen in maßstabsgleichen Quellentfernungen im Original- und im Modellmaßstab für Versuche im hindernisfreien Modellgebiet (links) sowie für Versuche bei Anwesenheit des Würfelhindernisses an  $x_{iH} = 0,25b_T$  stromauf der Quelle (rechts)

Im direkten Vergleich der gemessenen (unkorrigierten) Werte ergeben sich für den hindernisfreien Fall quantitativ mit Ausnahme vom quellnächsten Messpunkt Konzentrationen im Großversuch, die im Mittel oberhalb derer des Modellversuchsstands liegen. Für das Würfelhindernis übertreffen die im Originalmaßstab gemessenen Konzentrationen – sowohl mittig axial als auch lateral – jene des Modellversuchsstands in einem noch höheren Maße, dass selbst unter Beachtung der Streuung ein erheblicher Abstand zur idealtypischen Geraden verbleibt.

Tabelle 4-2 gibt überdies Auskunft über die absolute Differenz der in Abbildung 4-13 aufgetragenen Konzentrationen von Modellmaßstab zu Originalmaßstab sowie der sich daraus resultierenden prozentualen Abweichung bezogen auf die Werte im Originalmaßstab. Die im hindernisfreien Fall geringste Abweichung besteht in der Entfernung  $x = 1,04b_T$  (QIR 210) mit 0,26 Vol-%, die betragsmäßig mit Abstand größte Differenz herrscht unter anderem aufgrund des beschriebenen Messartefakts am quellnächsten Messpunkt (QIR 110) mit 1,36 Vol-%. Die maximale prozentuale Abweichung liegt bei kleiner  $\pm 50$  %. Absolut gesehen nimmt die Differenz für die hindernisbehaf-tete Konfiguration mit Quellentfernung allgemein ab und ist nicht größer als im hindernisfreien Fall. Bedingt durch die niedrigere Bezugskonzentration ergibt sich indes eine höhere prozentuale Abweichung von bis zu 76%.

*Tabelle 4-2: Absolute Differenz in Vol-% sowie prozentuale Abweichung der Konzentrationen von Modellmaßstab zum Originalmaßstab bei a) Hindernisfreiheit des Modellgebiets und b) mit Anwesenheit des Würfelhindernisses*

		<b>QIR 110</b>	<b>QIR 210</b>	<b>QIR 310</b>	<b>QIR 410</b>	<b>QIR 510</b>	<b>QIR 610</b>
<b>a) hindernisfrei</b>	Absolute Differenz [Vol-%]	-1,36	0,26	0,63	0,44	-	-
	Prozentuale Abweichung	-48 %	11 %	35 %	40 %	-	-
<b>b) mit Hindernis</b>	Absolute Differenz [Vol-%]	0,61	0,60	0,42	0,34	0,29	0,24
	Prozentuale Abweichung	54 %	67 %	66 %	68 %	66 %	76 %

#### **4.6.3 Vergleich unter Berücksichtigung von Temperatureffekten**

Der direkte Vergleich besitzt nur eingeschränkt Aussagekraft. Treten Schwergase mit von der Umgebungstemperatur abweichender Temperatur aus der Quelle aus bzw. kommt es durch quellnahe Umwandlungsprozesse zu einer signifikanten Abkühlung der Quellgase, wirkt sich dies auf

den Konzentrationsverlauf aus. Diese der nicht-isothermen Freisetzung geschuldete Effekte (Details hierzu siehe bspw. [32] oder [21]) sind bei der Bewertung des Ausmaßes der Abweichung zu berücksichtigen. Für den Modellversuchsstand spielen etwaige Temperatureffekte keine Rolle. Dort wurde das Testgas aus der Gasphase der sich an die Umgebungstemperatur angeglichenen (ca. 20 °C) Propangasflasche entnommen, dass ohne merkliche Abkühlung aus der Quelle austrat, was isothermen Bedingungen entspricht. Anders in den Großversuchen, wo das Propan aufgrund der gewünschten größtmöglichen Freisetzungsrates in flüssiger Form der Quelle zugeführt wurde (siehe Ausführungen in Abschnitt 4.1). Beim Ausströmen von verflüssigten Gasen mit einer kritischen Temperatur oberhalb der Umgebungstemperatur, wie dem Propan, verdampft spontan ein Anteil. Die Energie dafür wird vorrangig dem Gas selbst entzogen, was zur Abkühlung auf seine Siedetemperatur führt. Die Konzentrationen wurden demnach unter nicht-isothermen Bedingungen gemessen und sind folglich für den Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Modellversuchsstand zunächst in isotherme umzurechnen. Die Temperaturkorrektur der Konzentrationen ist gemäß der Literatur [4, 32] in der Form:

$$c_i = \frac{c_{ni}}{c_{ni} + (1 - c_{ni}) \cdot T_U/T_Q} \quad (4.1)$$

vorzunehmen. Als Quelltemperatur  $T_Q$  des Propans wird dessen Siedetemperatur (-42 °C) angenommen. Hiernach besteht eine Temperaturdifferenz zwischen isothermer Freisetzung im Modellmaßstab und nicht-isothermer Freisetzung im Originalmaßstab von 62 K, woraus nach vorstehender Gleichung isotherme Konzentrationen im Originalmaßstab folgen, die (im Wertebereich  $\leq 5$  Vol-%) theoretisch um jeweils ca. 20 % niedriger sind als die real gemessenen. Die prozentuale Abweichung der gemittelten Konzentrationen aus dem Modellversuchsstand mit den nunmehr temperaturkorrigierten Konzentrationswerten des Großversuchsstands ist jeweils in Zeile i) in Tabelle 4-3 gegeben. Während eine verbleibende Abweichung von 26 % bei hindernisfreier Konfiguration möglicherweise noch als akzeptabel eingestuft werden kann, sind die Unterschiede für die Würfelkonfiguration von bis zu 70 % weiterhin beachtenswert groß. Verschärfend kommt hinzu, dass die Vergleichskonzentrationen im reduzierten Modellmaßstab dabei kleiner als die des Originalmaßstabs sind.

Tabelle 4-3: Prozentuale Abweichung der Konzentrationen für i) Mittelwert im Modellmaßstab zu temperaturkorrigiertem Mittelwert im Originalmaßstab sowie ii) ungünstigste Ausbreitungssituation im Modellmaßstab zu temperaturkorrigiertem Mittelwert im Originalmaßstab bei a) Hindernisfreiheit des Modellgebiets und b) mit Anwesenheit des Würfelhindernisses

Prozentuale Abweichung		QIR 110	QIR 210	QIR 310	QIR 410	QIR 510	QIR 610
a) hindernisfrei	i) $\bar{c}_{1:12}$ zu $\bar{c}_{1:1\_temperaturkorr.}$	-85 %	-11 %	19 %	26 %	-	-
	ii) $\bar{c}_{1:12} + 2RMS$ zu $\bar{c}_{1:1\_temperaturkorr.}$	-118 %	-44 %	-13 %	-12 %	-	-
b) mit Hindernis	i) $\bar{c}_{1:12}$ zu $\bar{c}_{1:1\_temperaturkorr.}$	43 %	59 %	57 %	60 %	57 %	70 %
	ii) $\bar{c}_{1:12} + 2RMS$ zu $\bar{c}_{1:1\_temperaturkorr.}$	-23 %	27 %	35 %	44 %	46 %	55 %

Zu bedenken gilt, dass die bis hierhin ausschließlich verwendeten zeitlich gemittelten Konzentrationen einer mittleren Ausbreitungssituation entsprechen. Im folgenden Fall soll geprüft werden, ob obere Aussage auch für den Vergleich der temperaturkorrigierten Werte vom Originalmaßstab mit einer angenommenen ungünstigsten Ausbreitungssituation im Modell gültig ist. Gemäß der *VDI 3783 Blatt 2* erhält man die Konzentrationswerte für die ungünstigste Ausbreitungssituation, indem zum gemittelten Wert das Doppelte der im Versuch ermittelten Standardabweichung hinzuaddiert wird. Wie Tabelle 4-3 Zeile ii) zu entnehmen ist, werden für das hindernisfreie Gebiet bei Annahme der ungünstigsten Situation in der Tat die (temperaturkorrigierten) Werte aus dem Großversuch nicht mehr unterschritten. Für den Fall des Würfelhindernisses verringert sich zwar (zwangsläufig) auch die Diskrepanz, jedoch nur in geringem Maße, sodass die prozentuale Unterschätzung (max. 55 %) dagegen weiterhin beträchtlich ist.

Diese Ergebnisse sind in Summe hinsichtlich der postulierten Ähnlichkeit und daraus folgenden weitgehenden Skalierbarkeit ein Stück weit unbefriedigend. Prozentuale Abweichungen von im Mittel 58 % geben Anlass zur kritischen Betrachtung, lassen allein aber noch kein Urteil zu, sofern nicht der Nachweis statistischer Signifikanz der Diskrepanz der Konzentrationsverläufe vorliegt.

#### 4.6.4 Signifikanztest der Abweichungen

Statistische Signifikanz der Unabhängigkeit zweier Mittelwerte kann mit dem *t-Test* (auch als *Student'scher Test* bekannt) nach *W.S. Gosset* geprüft werden. Voraussetzungen für dessen Anwendung ist mindestens die Unabhängigkeit und Zufälligkeit der Stichprobe(n) sowie die Normalver-

teilung der Messgröße(n) [87]. Der Grundgedanke lautet, umso weiter beide Stichprobenmittelwerte auseinanderliegen, desto unwahrscheinlicher ist ein gemeinsamer Mittelwert. Für den Vergleich zweier unabhängiger, streuender Stichproben ist ein Zweistichproben-t-Test durchzuführen. Als Nullhypothese  $H_0$  wird definiert, dass der wahre Mittelwert beider Verteilungen der selbe ist; mathematisch  $\bar{x} = \mu$ . Der probabilistische Testwert  $t_p$ , an dem  $H_0$  geprüft wird, berechnet sich in dem Fall nach:

$$t_p = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.2)$$

mit der gemittelten Standardabweichung  $s_d$  beider Stichproben:

$$s_d = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4.3)$$

Der Freiheitsgrad  $f = n_1 + n_2 - 2$ . Der ermittelte Wert für  $t_p$  ist mit den tabellierten t-Werten der Student-Verteilung zu vergleichen. Bei genügend großer Stichprobengröße geht die t-Verteilung in die Normalverteilung über. Die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha_p$  gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese fälschlicherweise abgelehnt wird, obwohl sie richtig ist (Fehler 1. Art). Ist:

- $t_p < t_{0,95}$ , so unterscheiden sich  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  nicht
- $t_p > t_{0,95}$ , so unterscheiden sich  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  wahrscheinlich
- $t_p > t_{0,99}$ , so unterscheiden sich  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  signifikant
- $t_p > t_{0,999}$ , so unterscheiden sich  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  hochsignifikant.

Der Wert im Index von  $t$  repräsentiert das Konfidenzniveau, welches sich nach  $1 - \alpha_p$  ergibt. Ein Konfidenzniveau von bspw. 0,99 entspricht somit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % und besagt, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % es keinen gemeinsamen wahren Mittelwert gibt, also zwei unabhängige Grundgesamtheiten vorliegen. Dieser Wert wird als groß genug eingeschätzt, um statistisch signifikant zu sein. Tabelle 4-4 weist den Vergleich für die verglichenen Mittelwerte an den einzelnen axialen entfernungsabhängigen Messpunkten aus. Der Signifikanztest liefert für die unkorrigierten (gemessenen) Ensemblemittelwerte bei hindernisfreiem Gebiet keine eindeutige Aussage; mit Hindernis ist der Unterschied beinahe durchweg hochsignifikant.

Tabelle 4-4: Konfidenzniveau für Testwert  $t_p$  bei Signifikanztest der i) unkorrigierten sowie ii) temperaturkorrigierten gemittelten Konzentrationen von Modellmaßstab zum Originalmaßstab bei a) Hindernisfreiheit des Modellgebiets und b) mit Anwesenheit des Würfelhindernisses

		QIR 110	QIR 210	QIR 310	QIR 410	QIR 510	QIR 610
a) hindernisfrei	i) Unkorrigierte Mittelwerte	> 0,999	< 0,8	> 0,95	> 0,95	-	-
	ii) Temperaturkorrigierte Mittelwerte	> 0,999	< 0,8	< 0,8	< 0,8	-	-
b) mit Hindernis	i) Unkorrigierte Mittelwerte	> 0,99	> 0,999	> 0,999	> 0,999	> 0,999	> 0,999
	ii) Temperaturkorrigierte Mittelwerte	> 0,95	> 0,99	> 0,999	> 0,999	> 0,999	> 0,999

Unter Berücksichtigung der Temperaturkorrektur – wobei angenommen wird, dass sich dabei lediglich die Mittelwerte um 20 % reduzieren, ihre Streuung jedoch unverändert bleibt – liegen die Konzentrationsdifferenzen im hindernisfreien Fall (mit Ausnahme der benannten messtechnisch verfälschten vordersten Messstelle) nunmehr unterhalb des Wahrscheinlichkeits-Niveaus. Bei der gegebenen Stichprobengröße könnten die offenbarten Differenzen damit ausschließlich zufällig sein.

Für das hindernisbehaftete Gebiet sieht dies anders aus. Hier befinden sich nach Temperaturkorrektur die Differenzen durchweg über dem Wahrscheinlichkeits-Niveau bzw. in der Mehrheit über dem Hochsignifikanz-Niveau. Damit liegt der Nachweis vor, dass für diesen Fall die Unterschiede als signifikant erachtet werden müssen.

Aus den vorgenannten Gründen sind die Versuchsergebnisse der sogenannten Verifizierungskonzentration aus Abschnitt 4.4 vorsorglich nicht in die Berechnung der Regressionsgraden in Abschnitt 3.9.4 eingeflossen.

#### 4.6.5 Ursachenermittlung für signifikante Diskrepanz

Wird nicht per se die Gültigkeit der postulierten Skalierbarkeit angezweifelt, ist nach den wahrscheinlichen Ursachen für die nachgewiesenen signifikanten Diskrepanzen zu suchen.

Der Diskussion vorangesetzt sei, dass die Beobachtung von im Modellversuchsstand systematisch geringeren Konzentrationen bei der Nachbildung von Schwergasverhalten generell nicht ungewöhnlich ist. *Van Heugten et al.* erhielten im direkten Vergleich bis zu 70 % geringere Maximalkonzentrationen im Windkanal [100]. Vereinzelt wird dafür in der Literatur die Anwendung der

Boussinesq-Approximation, also der Modellierung im Windkanal mit größeren Dichteverhältnissen als im Original, verantwortlich gemacht [41]. Da in dieser Arbeit in beiden Maßstäben mit gleichen Stoffen und damit mit gleichen Dichteverhältnissen gearbeitet wurde, kann dies im hiesigen Fall als Ursache der beobachteten Diskrepanz ausgeschlossen werden.

Einen Anhaltspunkt liefert hingegen der Umstand, dass die offenbarten, existenten Betriebseinschränkungen des Großversuchsstands dazu zwangen, den Modellversuchsstand hinsichtlich beider einzustellender Parameter Strömungsgeschwindigkeit und Freisetzungsrates in seinem technisch- und physikalisch-realiserbaren unteren Grenzbereich betreiben zu müssen. Wie schon in Abschnitt 4.4 angemerkt, besteht nach der vorangegangenen Analyse demgemäß nunmehr der begründete Verdacht, dass die im Modellmaßstab notwendigerweise umzusetzende Strömungsgeschwindigkeit zu gering gewesen ist, um – insbesondere im hindernisverstellten Fall – vollständige Reynoldszahlunabhängigkeit zu erreichen. Die Folge davon wären unähnliche Strömungsverhältnisse im Ausbreitungsgebiet und insbesondere bei der Hindernisumströmung, die vollständig oder zumindest graduell zu anderen Stoffübertragungsbedingungen im Modellmaßstab führten. Einen Hinweis darauf liefert die in Abbildung 4-12 rechts für den Hindernisfall dargestellte laterale Konzentrationsverteilung in der Entfernung  $x = 1,5625b_T$ , die im Modell homogenere Konzentrationen als im Original zeigt. Augenscheinlich war mindestens der laterale Transport im Modell stärker, womit alle axial mittigen Konzentrationen somit geringer ausfallen als im Original. Einen Ausweg aus dieser unvorteilhaften Konstellation bietet nur die vorrausichtlich aufwändige und kostenintensive Ertüchtigung der Lüftungsanlage im Großversuchsstand hin zu höheren förderbaren Volumenströmen.

Einen die Ähnlichkeit widerlaufenden Effekt kann überdies die Unterschiedlichkeit der jeweils verwendeten Quellgeometrien besitzen. Auch wenn die Höhe der Quellöffnung maßstabsgerecht übereinstimmt, konnte im Modelltunnel das Gas im Unterschied zum Originalmaßstab auch über die obere Deckfläche entweichen. Ihr Anteil macht zwar nur 20 % der Gesamtfreisetzungsfläche der verwendeten Fritte aus, wie Abschnitt 3.7.6 zeigte, reagieren die Konzentrationen jedoch sehr sensitiv auf den Abstand der Quelle vom Boden. Schon ein relativ kleines Anheben von 5 cm zog eine Reduktion der bodennahen Konzentrationen von bis zu 2/3 nach sich.

Neben prinzipiellen Zweifeln an der Vergleichbarkeit der Strömungs- wie Quellbedingungen können ebenso vergleichsweise „banalere“, messtechnische Ursachen ihren Anteil an der offenbarten Abweichung haben. Zu nennen ist die Idealisierung der im Großversuch beobachteten realen Freisetzungseigenschaften der Quelle. Wie Abbildung 4-5 verdeutlicht, ist nach Freisetzungsbeginn der Flüssiganteil zunächst geringer als die pauschal angenommenen 30 %. Im Umkehrschluss

würde der reale Gasmassenstrom der Anfangsphase systematisch unterschätzt. Ein höherer Gasmassenstrom führte gemäß der Massenstromabhängigkeit aus Abschnitt 3.7.1 zu höheren Konzentrationen im Großversuch.

Dass die im Versuch variierenden Umgebungsbedingungen (Kontakt mit der auf Siedetemperatur abgekühlten Propanwolke) signifikanten Einfluss auf die Messstabilität der Konzentrationsmessung nehmen, wird dagegen als eher unwahrscheinlich angesehen. Wenngleich eine spezifische Analyse der Sensorik hinsichtlich Umwelteinflüssen stets und auch im Nachgang empfehlenswert ist, ist den verwendeten Gastransmittern eine prinzipielle Eignung für den eingenommenen Temperatur- und Feuchtebereich vom Gerätehersteller bescheinigt worden [8].

#### 4.6.6 Vergleich anhand des Hinderniseinflusses

Auf eine weitere Vergleichsmöglichkeit sei an dieser Stelle eingegangen. Für die Beurteilung der Maßstabsunabhängigkeit kann ebenso bzw. zusätzlich die Diskrepanz der mit der Einführung des Hindernisses konkret einhergehenden Konzentrationsreduktion zwischen den Maßstäben herangezogen werden. Auf die generelle Tatsache, dass mit dem Einführen des Würfelhindernisses ins Versuchsgebiet auch im Großversuchsstand prinzipiell ein merkliches Absinken der Konzentrationen verbunden ist, wurde bereits in Abschnitt 4.5.3 eingegangen. Tabelle 4-5 führt – erneut positionsbezogen – die Änderung der Konzentration bei Hinderniseinführung separiert in Groß- sowie Modellversuch auf. Als Vergleichskriterium wird erneut die prozentuale Abweichung von Modellmaßstab zu Großmaßstab bezogen auf letzteren verwendet. Bis auf den quellnächsten Messpunkt, der durch die beschriebenen Eigenheiten eine Sonderrolle einnimmt, ist die Abweichung an den verbleibenden drei Vergleichspunkten im Bereich von  $\pm 20\%$  des Messwertes im Originalmaßstab, welche statistisch nicht signifikant ist.

*Tabelle 4-5: Änderungen der Absolutwerte der Konzentration in Vol-% durch Einführen von Würfelhindernis ins Modellgebiet im Kleinversuchsstand (Maßstab 1:12) und im Großversuchsstand (Maßstab 1:1) sowie maßstabsübergreifend prozentuale Abweichung bezogen auf Originalmaßstab*

	<b>QIR 110</b>	<b>QIR 210</b>	<b>QIR 310</b>	<b>QIR 410</b>	<b>QIR 510</b>	<b>QIR 610</b>
Abnahme der Konzentration in Vol-% im 1:12-Versuchsstand	3,69	1,71	0,94	0,48	0,22	0,09
Abnahme der Konzentration in Vol-% im 1:1-Versuchsstand	1,72	1,37	1,15	0,58	-	-
Prozentuale Abweichung der Konzentrationsabnahme	-53%	-20%	+22%	+20%	-	-

Jene vergleichsweise geringe Abweichung sollte nicht isoliert betrachtet und daraus heraus vor- schnell als Beleg für eine bestehende Maßstäblichkeit interpretiert werden. Im Lichte der Ausführungen und Erkenntnisse des vorhergehenden Abschnitts sollte es vielmehr als zufälliges Ergebnis gewertet werden.

#### 4.6.7 Vergleich mit abgeleitetem tunnelspezifischem Nomogramm

Abschließend wird geprüft, ob neben der Verifizierungskonfiguration auch die Werte aus den Regressionskurven des Nomogramms in Abschnitt 3.9.4, die ja auf den Versuchsergebnissen im Modellmaßstab beruhen, ebenfalls die im Großversuch gemessenen Werte wahrscheinlich unterschreiten. Träfe dies zu, so ergäben sich weitreichende Konsequenzen für den Anwendungsrahmen des abgeleiteten grafischen Modells. Man befände sich entgegen dem üblichen Sicherheitsparadigma bei der Abschätzung der unteren Zünddistanz nicht auf konservativer Seite.

Wie Abbildung 4-14 verdeutlicht, ist diese Sorge unbegründet. Die mit dem tunnelspezifischen Nomogramm prognostizierte Konzentration ist jeweils deutlich höher als jene, welche im Originalmaßstab in der jeweiligen Quellentfernung gemessen wurde. Der kleinste Abstand zum prognostizierten Verlauf (am entferntesten Messpunkt QIR410 gegeben) beträgt das 3,4fache der Ensemblestandardabweichung der gemessenen Werte, womit bei Annahme von Normalverteilung mehr als 99,9 % der real auftretenden Konzentrationen eingeschlossen werden.

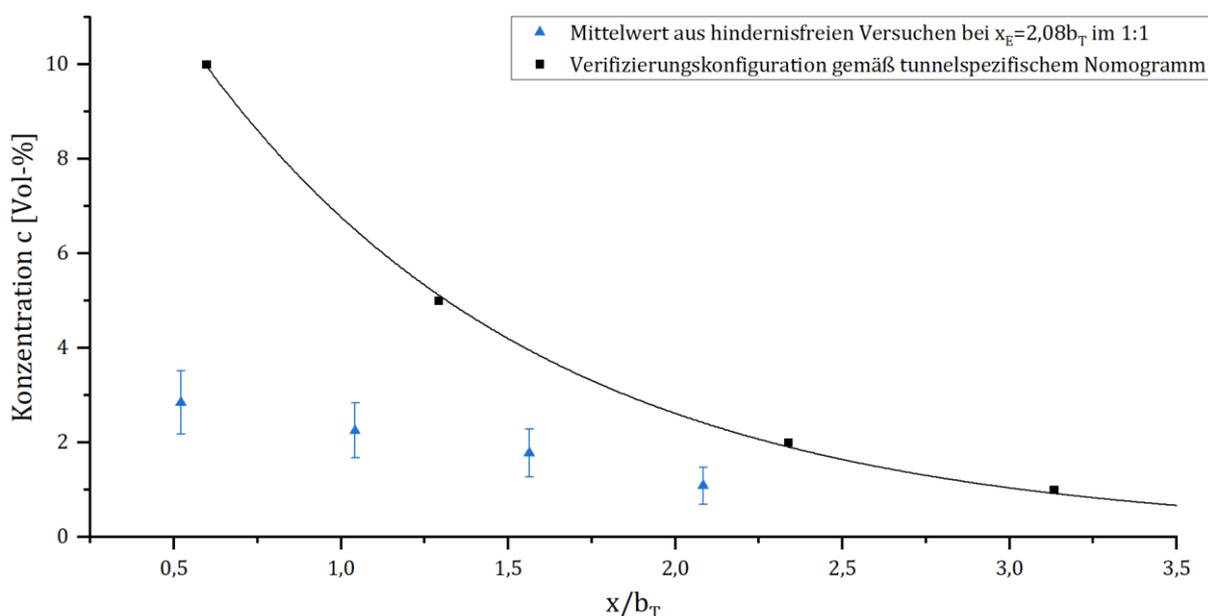


Abbildung 4-14: Vergleich der gemessenen Konzentrationen im Großversuch bei hindernisfreiem Modellgebiet mit dem sich aus dem tunnelspezifischen Nomogramm für die Konfiguration ergebenden, prognostizierten Verlauf der longitudinalen Konzentrationen

## 4.7 Neue Erkenntnisse zur Ausbreitung nach den Großversuchen

Die in Kapitel 4 vorgestellten Untersuchungen im Originalmaßstab förderten einige neue Erkenntnisse zum Ausbreitungsverhalten zu Tage. Die Freisetzung ist zum einen mit „Nebelbildung“, also der Kondensation des Wasserdampfs aus der Luft bei Kontakt mit dem durch Verdampfung abgekühlten Propan, verbunden. Zum anderen zeigt sowohl die visuelle Begutachtung als auch die starke Fluktuation der Konzentration an den lokalen Messpunkten über die Versuchsdauer, dass der Prozess von Ausbreitung und Verdünnung ausgeprägt instationär ist und im Detail komplexer abläuft, als es den Messdaten aus dem Modellversuchsstand zu entnehmen ist. Ob die Ursache hierfür in der versuchsstandbedingten eingeschränkten Reproduzierbarkeit der Tunnelströmung im Großversuchsstand zu suchen ist, in der besseren zeitlichen Auflösung der Konzentrationen begründet liegt oder auf einen tatsächlich nicht vernachlässigbaren Skalierungseffekt zurückgeht, kann an dieser Stelle nicht weiter erörtert werden. Die Klärung dieser Fragestellung ist nur in weitergehenden Versuchen möglich und setzt bezogen auf den aktuellen Großversuchsstand zusätzliche Investitionen in Messtechnik und den Versuchsstand in nach Abschätzung erheblichem Maße voraus.

Kritisch zu hinterfragen, sind die maßstabsabhängigen Unterschiede der gemittelten Konzentrationen an den axialen Messpunkten. Ein Mindestmaß an Übereinstimmung ist durch die qualitativ in guter Näherung ähnlichen longitudinalen Konzentrationsverläufe wie einem ähnlichen konzentrationsenkenden Einfluss bei Einführung des Würfelhindernisses gegeben. Quantitativ verbleiben indes auch nach Berücksichtigung möglicher Einfluss nehmender Temperatureffekte Differenzen in den Konzentrationen, die zumindest im Falle des hindernisbehafteten Gebietes bei gegebener Stichprobengröße signifikant sind. Als primär verantwortlich hierfür werden erneut die spezifischen Probleme der Großversuche und in deren Konsequenz wahrscheinlich signifikant andere Strömungsbedingungen bei den im Kleinen nachgebildeten Verifizierungskonfigurationen eingeschätzt.

## **5 Schlussfolgerungen**

### **5.1 Zusammenfassung der Ausbreitung schwerer Gase in tunnelartigen Umschließungen**

Ausgehend wird der Versuch unternommen, auf Basis der gesammelten Einzelbefunde die Ausbreitung von Propan in tunnelartigen Umschließungen möglichst allgemein zu charakterisieren. Aus den kleinmaßstäblichen Versuchen lassen sich dabei die wesentlichen Charakteristiken der sich ausbreitenden Schwergaswolke entnehmen. Die Großversuche erweitern dieses Bild von der Ausbreitung um wesentliche Aspekte.

#### **5.1.1 Allgemeines Ausbreitungsverhalten von Propan**

Wird Propan freigesetzt, kondensiert die Feuchtigkeit in der Luft aus, was als Nebel, der sich hauptsächlich um die Quelle verteilt, wahrgenommen wird. Die Luftströmung treibt das im Tunnel impulsfrei freigesetzte Propan anschließend stromab in Richtung des Ausgangsportals. Entgegen der Strömung breitet sich die Wolke bei ungünstiger Fahrbahn demgegenüber nicht in relevantem Maße aus. Bei kontinuierlicher Freisetzung stellen sich im Laufe des Ausbreitungsprozesses annähernd quasistationäre Verhältnisse ein. Innerhalb der stromab befindlichen Wolke nimmt die Konzentration dann einen exponentiell abfallenden Verlauf. Größerskalige Luftwirbel – sofern vorhanden – sind jedoch in der Lage, lokal die Einheit der Wolke aufzubrechen.

Das testweise Anheben ausgewählter Messpositionen liefert den Nachweis, dass die Ausbreitung des Propans zudem ausnahmslos in der bodennächsten Schicht erfolgt. Bereits in geringer Höhe sind nur noch geringe Spuren von Propan vorhanden. Das Bestreben mit zunehmender Quellentfernung vertikal aufzusteigen ist ebenfalls nur gering. Propan zeigt damit ein ausgeprägtes Schwergasverhalten in der Tunnelumgebung.

Lateral wird der Ausbreitungsraum durch die Tunnelwände begrenzt. Der Tunnel kanalisiert die Ausbreitung, so dass die Hauptausbreitungsrichtung mit der Tunnellängsachse zusammenfällt. Sofern die Wolke noch nicht die gesamte Tunnelbreite eingenommen hat, fällt die Konzentration lateral von der Mitte zu den Seiten hin ab. Die starke Streuung der Konzentration lässt auf eine noch hohe Variabilität der Wolke in diesem Bereich schließen. Ist die gesamte Tunnelbreite eingenommen, homogenisiert sich die Wolke über die Tunnelbreite. Im Weiteren steht für die Ausbreitung die laterale Raumrichtung nicht mehr zur Verfügung.

### 5.1.2 Einfluss von Parametern im hindernisfreien Straßentunnel

Aus der Variation einzelner Parameter kristallisieren sich Faktoren heraus, die erheblichen Einfluss auf die Verdünnung im Tunnel nehmen.

Vergrößert sich die Rate, mit der das Schwergas (Propan) freigesetzt wird, so steigt das Konzentrationsniveau stromab der Quelle allgemein an. Dabei lässt sich im Detail noch einmal in unmittelbare Quellnähe ( $x \leq 1,6b_T$ ) und quellfernere Bereiche ( $1,6b_T < x \leq 3,2b_T$ ) unterscheiden. Bei Zunahme der Freisetzungsrates steigen zunächst die Konzentrationen quellnah überproportional stark an, bis zu einem Niveau, welches bei den untersuchten Konfigurationen oberhalb der OEG lag, erreicht ist, welches bei weiterer Zunahme der Freisetzungsrates nicht überschritten wird. Die Konzentrationen quellfern steigen ungeachtet dessen indes weiter an, womit sich die longitudinale Verdünnung allmählich wieder verringert und die longitudinale Konzentrationsverteilung schließlich einem Zustand mit nur geringer Verdünnung zustrebt. Mit diesem Geschehen geht eine Vergrößerung der UZD einher.

Einen ähnlich starken, jedoch der Freisetzungsrates gegensätzlichen Einfluss auf den longitudinalen Konzentrationsverlauf nimmt die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel. So sinken die Konzentrationen mit Anheben der Strömungsgeschwindigkeit. Der Abbau der Konzentration von einem hohen Niveau erfolgt dabei in zur Freisetzungsrates umgekehrter Weise. In der Praxis bedeutet das, dass mit dem Hochfahren der Lüftungsanlage in jedem Fall eine – je nach Freisetzungsrates stärkere oder schwächere – Reduktion des explosionsfähigen Bereiches erreicht wird; diese Maßnahme also einer Entspannung der Gefahrensituation zuträglich ist.

Zwischen Freisetzungsrates und Strömungsgeschwindigkeit bestätigt sich somit die aus der allgemeinen Phänomenologie von Schwergasen zu erwartende gegensätzliche Einflussnahme auf den longitudinalen Verdünnungsprozess auch für die Umgebung im Inneren von Straßentunneln. Wie sich im Weiteren herausstellte, ist aber nicht die sich aus dem Verhältnis beider Parameter sowie der effektiven Fallbeschleunigung ergebene densimetrische Froudezahl für den sich einstellenden, quasistationären Konzentrationsverlauf im ungeneigten, hindernisfreien Modelltunnel allein ausschlaggebend, sondern es ist zusätzlich die Tunnelbreite in dieses Konzept miteinzubeziehen, was in der Erweiterung der densimetrischen zur tunnelbezogenen densimetrischen Froudezahl mündete.

Aus dem sich anschließenden Vergleich der longitudinalen Konzentrationsverläufe mit bekannten Profilen aus der Literatur wird deutlich, dass bei einem  $Fr_{DT}$ -Verhältnis größer 50 die das Ausbreitungsgebiet lateral begrenzenden Tunnelwände demnach noch keine Rolle spielen – die Ausbreitung also einer Ausbreitung im ebenen, hindernisfreien Gebiet gleicht. Verkleinert sich das  $Fr_{DT}$ -Verhältnis unter einen Wert von circa 50, beginnt das Konzentrationsniveau allgemein

zu steigen, was für einen zunehmenden Einfluss der Tunnelwände bzw. eine Interaktion der Schwergaswolke mit den Tunnelwänden spricht. Zur Abschätzung der Konzentrationsbereiche in diesen Fällen wird empfohlen, das in dieser Arbeit abgeleitete grafische Modell zu verwenden.

Die Längsneigung der Fahrbahnoberfläche im für Verkehrswege in Tunnelbauwerken zulässigen Bereich zieht im Unterschied zu den beiden vorgenannten Parametern keine Änderung der Verdünnungscharakteristik stromab der Quelle nach sich. Weitreichend ist jedoch die Beobachtung, dass die Wolke unter bestimmten Bedingungen ebenso stromauf propagiert. Dieses auch von Brandrauchgasen an Tunneldecken bekannte Verhalten soll in Analogie dazu hier als *bodennahes Backlayering* bezeichnet werden, welches im vorliegenden Fall in relevantem Maße bei der Mindestlüftungsgeschwindigkeit jedoch erst bei starker Längsneigung ( $\geq 5\%$ ) auftritt.

Bei Querneigung der Oberfläche konzentriert sich die Wolke, wie es dem Charakter von Schwergasen entspricht, auf die Seite des Versuchsgebietes, welche neigungsgemäß am tiefsten liegt. Erwartungsgemäß ist die Konzentrationsdifferenz zwischen den außermittigen Messpunkten in Quellnähe am größten. Die quellentfernungsspezifischen Maximalkonzentrationen sind indes zum ungeneigten Fall nicht signifikant erhöht. Konzentrationsunterschiede über die Tunnelbreite ergeben sich in der Tunnelmitte ebenso bei außermittiger Lage der Quelle, die aber ebenfalls auf die direkte Quellnähe beschränkt sind. Bei der longitudinalen Verdünnung des Schwergases im Straßentunnel spielen die Querneigung der Fahrbahn als auch die Lage des Quellortes auf dem Boden folglich nur eine vernachlässigbare Rolle.

Anders verhält es sich, wenn sich die Quelle aufgrund des Unfallgeschehens höher als auf Höhe des Bodens befindet. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion der bodennahen Konzentrationen stromab. Als Ursachen hierfür können die verbesserte Einwirkung der Strömung auf die nun allseits umströmte Quelle ebenso wie die zur bodennahen Schicht geänderten Turbulenzbedingungen vermutet werden. In Verbindung mit einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit liegen zudem die Bereiche der bodennah höchsten Propankonzentrationen nicht mehr an der Quelle, sondern verschieben sich weiter stromab. Von der Quellerhöhung geht also auch im Tunnel ein signifikanter, dabei ausschließlich verdünnungsfördernder Effekt aus.

### **5.1.3 Einfluss von Hindernissen auf die Ausbreitung im Straßentunnel**

Die weiteren Untersuchungen zielten auf die Analyse der Ausbreitung des Propans im Straßentunnel respektive der Verdünnung bei Anwesenheit von Hindernissen, wie sie Fahrzeuge darstellen, ab. Naturgemäß sind die im Ausbreitungsgebiet auf dem Boden befindlichen Hindernisse von der Schwergaswolke zu umströmen. Es zeigte sich, dass der Einfluss aerodynamisch stumpfer Einzelhindernisse im Tunnel beinahe ausschließlich auf die lokale Umgebung um das Hindernis beschränkt ist. Aus Sicht der Tunnelsicherheit geht im zweispurigen Tunnel weder bei höheren

Freisetzungsraten noch bei einer Entfernung größer  $0,625b_T$  von dem Ort der Freisetzung ein signifikanter verdünnungsförderlicher Einfluss vom Hindernis aus. Die Konzentrationen sinken allenfalls moderat ab. Erst mit weiterer Annäherung des Hindernisses an die Quelle, so dass die Quelle in den Einflussbereich des Totwassergebietes des Hindernisses gerät, treten relevante Auswirkungen auch in Quellferne in Erscheinung. Ursächlich hierfür könnte die damit verbundene erhöhte Turbulenz um die Quelle sein, welche auf die Quelle wirkt und für eine rasche Querverteilung über die Breite des Modellgebietes sorgt, woraus insbesondere mit Abnahme der quellnahen Konzentrationen ein annähernd linearer longitudinaler Verlauf mit geringer Abnahme resultiert. Bei hohen Freisetzungsraten ist eine starke Tendenz zur lateralen Ausbreitung, wie die Untersuchungen in Abschnitt 3.7.1 bereits zeigten, von Haus aus gegeben, so dass an dieser Stelle kein zusätzlicher verdünnungsfördernder Effekt mehr vom Hindernis ausgeht. Gleichzeitig ergibt der Vergleich der Konzentrationen an punktuell erhöhter Messposition (Abschnitt 3.8.2), dass unter anderem auch kein stärkerer vertikaler Transport durch das Hindernis induziert wird.

Diese Darstellung gilt respektive auch für ein stromab der Quelle befindliches Einzelhindernis. Eine Stauung der Wolke vor dem Hindernis ließ sich ebenfalls nicht beobachten. Vielmehr scheinen sich die Stoffströme mit Passieren des Hindernisses zu teilen, so dass mit dem daraufhin entstandenen verminderten Strömungsquerschnitt die seitlichen Konzentrationen steigen. In das Totwassergebiet gelangt dabei gleichzeitig nur vergleichsweise wenig Propan.

Es ergibt sich das Bild von einem Hindernis, dessen verdünnungsfördernde Wirkung maßgeblich auf die Möglichkeit zur lateralen Verbreiterung der Wolke zurückgeht (beschränkt auf großes  $Fr_{DT}$ -Verhältnis). In allen anderen Konstellationen der Freisetzung schwerer Gase im Tunnel sind die Ausbreitungsmöglichkeiten durch die lateralen Wände einerseits und durch ihr eigenes schwergasbedingtes Verhalten andererseits jedoch bereits so stark eingeschränkt, dass der entsprechende in anderen Ausbreitungsgebieten gegebene Hinderniseinfluss im diskutierten Fall nicht mehr auftritt.

Der Einfluss mehrerer strukturiert angeordneter Hindernisse ist positionsabhängig, bleibt jedoch größtenteils auf die Bereiche zwischen den Hindernissen beschränkt. Wird die Hindernisanzahl an quellentfernter Position erhöht, so besteht kein unmittelbarer Effekt auf die Verdünnung. Mehrere Hindernisse um die Quelle verteilt, erhöhen dagegen die Konzentrationen in der Tunnelmitte insbesondere quellnah. Auffällig sind die gleichzeitig verminderten Konzentrationen an den äußermittigen Messpunkten. Diese Beobachtungen münden in der Vorstellung einer lokal lateral teilbehinderten Ausbreitung der Wolke bei quellnaher Anordnung der Hindernisse. Ein nachhaltiger globaler Effekt resultiert hieraus aber nachweislich nur bei Konstellationen, die wie beim Einzelhindernis nicht von Haus aus die gesamte Tunnelbreite einnehmen, also ein großes  $Fr_{DT}$ -Verhältnis aufweisen. Letztlich bestimmt damit in hohem Maße das  $Fr_{DT}$ -Verhältnis wiederum

den longitudinalen Konzentrationsverlauf bzw. die UZD. Eine möglichst hohe Längsströmungsgeschwindigkeit ist dementsprechend auch hier Mittel der Wahl zur effektiven Absenkung der Propankonzentration im Tunnelinneren.

## 5.2 Szenariobezogene Sicherheitsbetrachtung

### 5.2.1 Entwurf eines Ereignisablaufs

Die UEG von Propan beträgt 1,7 Mol-% [5]. Wird die Tunnellüftung unter den Mindestanforderungen für die Strömungsgeschwindigkeit betrieben, erstreckt sich der Bereich stromab des Freisetzungsortes, in dem eine explosionsfähige Atmosphäre vorliegt, für den zweispurigen Straßentunnel im Normallüftungsbetrieb schon bei vergleichsweise kleinen Freisetzungsraten, wie sie in konstanter Form auch bereits bei Leckagen von Fahrzeugtanks eintreten könnten, über eine Entfernung vom mindestens dem Dreifachen der Tunnelbreite bzw. 30 m. Mit Steigerung der Freisetzungsraten steigen die Propankonzentrationen am Boden alsdann rasch an. Bedingt durch das ausgeprägte Schwergasverhalten nimmt dabei die Wolke in ihrer vertikalen Mächtigkeit nicht signifikant zu, vielmehr wächst in der Folge auch flächenmäßig der bodennah explosionsfähige Bereich entlang des Tunnels schnell an.

Bei impulsfrei freigesetztem Propan scheint das den Auswirkungen von *Weerheijm & van den Berg* [101] zugrundeliegende Szenario des vertikalen Ausbreitens der Propanwolke über den gesamten Tunnelquerschnitt (siehe Abschnitt 2.4.1) zumindest für die untersuchten Freisetzungsraten bis zu 1 kg/s bzw. einem  $Fr_{DT}$ -Verhältnis von größer 5,5 ausgeschlossen. Die sich mit dem Schwergasverhalten bestätigte ausgeprägte Tendenz sich vielmehr horizontal als vertikal auszubreiten verhindert ein uniformes Füllen des gesamten Tunnelinneren. Auch der in dieser Arbeit beobachtete, qualitativ dem der Literatur entsprechende Konzentrationsverlauf lässt es als unwahrscheinlich erachten, dass dieser von den beiden Autoren unterstellte Zustand der Wolke bei höheren Freisetzungsraten gegeben sein könnte.

Als wahrscheinlich wird hingegen das im Folgenden skizzierte Szenario angesehen: Entzündet sich die ausschließlich bodennah befindliche explosionsfähige Atmosphäre lokal an einer Zündquelle, so läuft die Reaktion aufgrund ihrer annähernd zweidimensionalen Form im Anschluss deflagrativ ab. Sehr wohl können dabei durch Wärmestrahlung, erhöhte Temperatur und umherfliegende Fragmente erhebliche Verletzungen involvierter Personen auftreten; kritische, die gesamte Strukturintegrität des Tunnelbauwerkes gefährdende Drücke sind dagegen nicht zu erwarten, da vertikal ausreichend Raum für die Expansion der Reaktionsprodukte zur Verfügung steht. Die anschließende Entzündung der im Wirkungsbereich der Durchzündung befindlichen leichtbrennbaren Materialien (bspw. an den Fahrzeugen) gilt als wahrscheinlich, wodurch in der Folge ein

Flächenbrand entstünde, der je nach Anzahl entzündeter Fahrzeuge erhebliche Brandlasten aufweisen könnte. Es ist dementsprechend bei der Ausbreitung brennbarer Gase schwerer als Luft in tunnelartigen Umschließungen nicht mit dem Szenario einer Gaswolkenexplosion großer Auswirkung, sondern vielmehr mit einem Flächenbrand zu rechnen, der im Weiteren nach den üblichen Mitteln der Brand- und Brandrauchbekämpfung in Tunneln (Brandunterdrückungs- und Rauchableitungsmaßnahmen) zu behandeln ist.

Das schwadenhafte Verhalten und die damit verbundenen starken Fluktuationen der Konzentrationen in den Großversuchen weisen darauf hin, dass an Stellen, an denen im zeitlichen Mittel die UEG unterschritten ist, temporär sehr wohl ein explosionsfähiges Gemisch vorliegen kann. Auch wenn damit kein zusammenhängendes explosionsfähiges Gebiet mehr besteht, können in Bereichen, die über die UZD hinausgehen, lokal begrenzte Zündungen eintreten, die bei der Abschätzung von Gefahrenbereichen zu berücksichtigen sind. Warum zur Festlegung von Sicherheitsabständen bei Schwergasen andere statistische Maße als das arithmetische Mittel geeigneter sind, hat kürzlich *Michel* [76] diskutiert. Überdies ist eine bodennahe Konzentration oberhalb der OEG nicht gleichbedeutend mit der generellen Abwesenheit einer Explosionsgefahr in jenem Gebiet. Vielmehr existieren bedingt durch die vertikale Abnahme der Konzentration zur selben Zeit Bereiche in nicht näher definiertem Ausmaß oberhalb des Bodens, in denen explosionsfähige Zusammensetzungen vorliegen.

Aus Sicht der Gefahrenanalyse stellen Fahrzeughindernisse primär potentielle Zündquellen dar. Auswirkungen auf die Wolkenzusammensetzung sind weitgehend lokal begrenzt. Abhängig von ihrer Position und Anzahl können Hindernisse dann verdünnungsfördernd oder konzentrationssteigernd Einfluss nehmen. Bei der tunnelweiten Festlegung der UZD ist eine besondere Berücksichtigung der Wände den Ergebnissen des Abschnitts 3.9.3.2 nach bei  $Fr_{DT}$ -Verhältnissen kleiner 50 nicht notwendig.

## 5.2.2 Erkenntnisse hinsichtlich Notfallstrategie

Insbesondere die folgenden Erkenntnisse der Arbeit sollten hinsichtlich der zu favorisierenden Strategie des Betriebspersonals als auch von Rettungskräften bei einem erkannten Unfall im Tunnel Beachtung finden.

Das Steigern der Geschwindigkeit der Längsströmung im Tunnel stellt den Ergebnissen der Versuche nach ein äußerst wirksames Mittel zur Absenkung der Propankonzentrationen und Verkleinerung des Gefahrenbereiches dar. Im Sinne der Einstellung möglichst verdünnungsfördernder Bedingungen sollte zukünftig vorbeugend auch bei Ausbleiben eines Brandes nach jedem erkannten Unfall die Lüftung auf die maximale Fördermenge schalten bzw. zumindest die Stellung für den Brandfall einnehmen, da zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt ist, ob es zu einer unfallbedingten

Freisetzung brennbarer Gase gekommen ist. Ist ein Brand erkannt, sollte zur Vermeidung von Rauchentwicklung auf Flucht- und Rettungswegen dann die Strömung zwingend auf die kritische Geschwindigkeit abgesenkt bzw. dort belassen werden. Mit Lüftungskonzepten, die überdies in der Lage sind, den bodennahen Bereich effektiv zu lüften, ließe sich der Gefahrenbereich weiter zielgerichtet mindern.

Da die Gase primär in Zwangsströmungsrichtung strömen, wird empfohlen, sich bei der Personenrettung zum Eigenschutz der Rettungskräfte von stromauf dem Freisetzungsort zu nähern. Das *Backlayering* – also ein Stromaufwandern des Gases gegen die Strömungsrichtung der Lüftung – welches bei Schwergasen bei extremer gegenläufiger Fahrbahnneigung bodennah entlang der Fahrbahn auftreten kann, ist dabei stets im Hinterkopf zu behalten. Gleichzeitig gilt zu bedenken, dass die mit im Falle nicht-isothermer Freisetzung verbundene „Nebelbildung“ von den Umgebungsbedingungen abhängt und deshalb kein hinreichendes Kriterium zur Abschätzung des Gefahrenbereiches darstellt.

### **5.3 Empfehlungen für weiteres methodisches Vorgehen**

Bei der Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von (schweren) Gasen in realen Ausbreitungsgebieten steht prinzipiell die gesamte Bandbreite von experimentellen bis hin zu numerischen Methoden zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde sich ausschließlich auf erstere gestützt, deren Anwendungsrahmen bezogen auf hindernisbehaftete, tunnelartige Umschließungen im Folgenden diskutiert werden soll.

Die durchgeführten Großversuche verdeutlichen exemplarisch die Schwierigkeiten, die mit der Umsetzung von Ausbreitungsversuchen im Originalmaßstab einhergehen. Zu Gunsten praktischer Umsetzbarkeit und zur Einhaltung des Kostenrahmens mussten Kompromisse eingegangen sowie Vereinfachungen im Versuchsaufbau vorgenommen werden, die zu Abweichungen vom zugrundeliegenden Szenario führten. Mit den abweichenden Strömungsbedingungen, den aufgrund der Windanfälligkeit eingeengten Versuchszeiträumen sowie der zwar über weite Strecken konstanten, aber nur mit geringer Rate umsetzbaren Stofffreisetzung offenbarten sich eindrucksvoll die bestehenden Hürden bzw. Herausforderungen, die mit diesem Ansatz einhergehen.

Nicht ganz losgelöst hiervon ist dann auch die Erkenntnis, dass trotz des Einsatzes umfassender Messtechnik sich die herrschenden Randbedingungen sowie die Zielgröße(n) im Ausbreitungsgebiet nur unbefriedigend im Großversuch erfassen ließen. Die dreidimensionalen Felder von Strömung, Turbulenz, gegebenenfalls der Temperatur sowie der Stoffkonzentration blieben damit räumlich zu grob aufgelöst, um bspw. den Einfluss von Faktoren verlässlich beurteilen zu können. Aus diesem Umstand resultiert, und dies gilt wohl generell, dass die experimentellen Messdaten aus dem Großversuchsstand in ihrer Qualität ungeeignet sind, um hieran etwa die Validierung

moderner numerischer Strömungsmodelle (CFD) vorzunehmen. Dies sollten folglich auch nicht Anspruch und Ziel der Durchführung von Großversuchen sein.

Überdies rückblickend unglücklich ist, dass alle die im Großen einzugehenden Kompromisse in der Folge zu im Kleinen wahrscheinlich anderen, nicht mehr vergleichbaren Strömungsbedingungen mit entsprechend anderen Stoffübertragungsbedingungen führten, so dass eine Verifizierung der Modellversuche an den originalmaßstäblichen Versuchen nur in Teilen gelang.

Diese teils generellen, teils dem Einzelfall zurechenbaren Schwächen sollten aber nicht dazu verführen, Großversuche prinzipiell als weniger wichtig oder als methodisch ungeeignet für Untersuchungen zur Schwergasausbreitung und damit als nachrangig zu werten. Großversuche stellen durch die exklusive Möglichkeit der Beobachtung unverzerrt ablaufender natürlicher Vorgänge eingedenk der versuchstechnischen Herausforderungen eine wertvolle, verbindliche Referenz dar und bilden damit auch weiterhin eine unverzichtbare Quelle des Erkenntnisgewinns (vgl. [78]). Der größte Nutzen großmaßstäblicher Versuche besteht in der Beobachtung und Dokumentation von Phänomenen wie Sekundäreffekten, die in idealisierten Modellversuchsständen nicht in Erscheinung treten (Vergleich der ausgeprägten Verwirbelung sowie Nebelbildung) und dort nur schwerlich realitätsnah – wenn überhaupt – modelliert werden können (kalte Zweiphasenströmungen). Bezüglich der gewählten Problemstellung offenbarten die Großversuche ferner die Variabilität der Ausbreitung, die selbst in einem lateral begrenzten Gebiet wie dem Straßentunnel vorherrscht. Die Großversuche ergänzen in dieser Hinsicht wesentlich die Kleinversuche. Demgemäß sollte mit Blick auf die Problemstellung weiterhin die Motivation bestehen, trotz erwartbar hohen Kosten und hohem Aufwand Freisetzungs- bzw. Ausbreitungsversuche in realen Straßentunneln unter realen Lüftungsbedingungen vorzunehmen – dann sicherlich unter Substitution der brennbaren gegen vergleichbare aber ungefährlichere Schwergase.

In den Versuchen im verkleinerten Maßstab konnten im Vergleich zum Großversuch wesentlich einfacher die für Sensitivitätsstudien benötigten „Laborbedingungen“ – das heißt kontrollierbare, konstante Randbedingungen – geschaffen werden. Darüber hinaus bestätigt sich, dass diese flexibel und mit weniger Aufwand variiert werden können. Wesentliche Voraussetzung ist, dass die Kriterien wie die Reynoldsunabhängigkeit eingehalten werden. Im Ergebnis stellten sich stabile quasistationäre Zustände bei ausreichend bekannten Randbedingungen ein, die selbst bei geringerer Anzahl von Messstellen als im Großversuch wesentlich besser geeignet waren, den Einfluss einzelner Faktoren auf die Ausbreitung zu identifizieren und zu quantifizieren – wenngleich im konkreten Fall bezogen auf die hierzu notwendige geringe Streuung der Zielgröße (Konzentrationsmittelwerte) weiterhin Optimierungspotential gegeben ist. Diesbezüglich wurde im entwickelten Kleinversuchsstand bereits der Versuch unternommen, den nur optisch abzulesenden Schwebekörperdurchflussmesser gegen einen kombinierten digitalen Massendurchflussmesser

sowie -regler zu ersetzen. Ebenso ließe sich durch Wahl einer längeren Mittelungszeit möglicherweise die Streuung weiter reduzieren. Denn auch wenn die Konvergenzanalyse in Abschnitt 3.5 am Beispiel von Sk 1 gezeigt hat, dass eine Mittelungszeit von 2 min für die Repräsentanz des Mittelwerts ausreicht, muss dies nicht konfigurationsübergreifend von Gültigkeit sein. Es stellte sich darüber hinaus heraus, dass das Versuchsgebiet für die Bestimmung der sicherheitsrelevanten UZD bei einer Reihe der getesteten Betriebsparameterkonfigurationen zu kurz bemessen ist.

Die Validierung numerischer Modelle kann daher realistisch nur an maßgeschneiderten Modellversuchen erfolgen. Die Möglichkeiten, die sich mit CFD prinzipiell eröffnen, sind beachtlich. Dennoch bestehen auch hierbei nicht weniger, sondern lediglich anders gelagerte methodische Herausforderungen. *Zinke* führt prinzipielle Unsicherheiten bzw. Fehlerquellen an. Die notwendigerweise auch hier einzugehenden Konventionen, Vereinfachungen und Parameterunsicherheiten führen in CFD-Simulationen bisweilen zu einer beträchtlichen Varianz der Ergebnisse [105].

Zusammenfassend sollte daher in Zukunft der dreigleisige Weg aus detaillierten und präzisen Maßstabsversuchen in problemangepassten Modellversuchsständen (Windkanälen), numerischen Simulationen sowie von Versuchen im Originalmaßstab als Referenz und in Ergänzung zu diesen weiterverfolgt werden. Großversuche sind insbesondere bei Fragestellungen, bei denen Kleinversuchsstände an ihre praktische Umsetzbarkeit stoßen, geboten. Dies ist etwa bei Untersuchungen der Ausbreitung sicherheitsrelevanter, brennbarer Stoffe wie LNG oder LH<sub>2</sub> unbestreitbar gegeben, welche anders als Propan nur unter kryogenen Bedingungen ein Schwergasverhalten zeigen – das heißt ihr Absinkvermögen hängt zusätzlich zur Konzentration entscheidend vom momentanen thermischen Zustand des Gas-Luft-Gemisches ab. Wobei für das Ausbreitungsgebiet „Straßentunnel“ dann der Fokus auf die realitätsnahe Nachbildung des Wärmeübergangs von Fahrbahnboden und Tunnelwände gelegt werden muss, was mit dem im Zuge dieser Arbeit realisierten Großversuchsstand jedoch nicht bzw. in der aktuellen Ausbaustufe noch nicht gegeben ist.

## 6 Ausblick

Die während der Großversuche generierten Daten wurden entsprechend dem Anliegen der vorliegenden Arbeit im Wesentlichen hinsichtlich der Frage nach gegebener Maßstäblichkeit ausgewertet. Gegebenenfalls können aus der Gesamtheit der Daten weitere Aspekte zur Ausbreitung des Propans im Versuchsgebiet ergründet werden. Beispielsweise sollte es möglich sein, aus den zeitlichen Konzentrationsverläufen an den Messstellen die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Wolke stromab ausbreitet, zu bestimmen sowie aufgrund der besseren messtechnischen zeitlichen Auflösung als im Modellmaßstab, die Fluktuation der Konzentration zu analysieren.

Im Vordergrund zukünftiger Aktivitäten sollte aus sicherheitstechnischer Sicht jedoch die Bestätigung der UZD für die Konfigurationen stehen, bei denen die Ermittlung der UZD bis dato einzig aus der Extrapolation der dargestellten longitudinalen Konzentrationsverläufe möglich ist. Dazu ist ein längeres Tunnelsegment als das verwendete zu wählen bzw. nachzubilden.

In den Untersuchungen wurden Freisetzungsszenarien mit einem  $Fr_{DT}$ -Verhältnis von 5,5 bis 424 experimentell nachgebildet. Dabei entspräche das kleinste Verhältnis im Original einer Freisetzungsrate von 1 kg/s bei halber Mindestströmungsgeschwindigkeit im zweispurigen Tunnel. Insbesondere im Hinblick auf Worst-Case-Szenarien in Straßentunneln wird angeraten, zukünftig unter diesen Bedingungen auch höhere Freisetzungsraten zu unterstellen. In erster Linie gilt zu klären, ob sich unter der Mindestlüftungsgeschwindigkeit dadurch die longitudinale Verdünnung der Wolke weiter verringert und damit einem Zustand ohne signifikante Verdünnung entlang des Tunnels zustrebt.

Wie sich erfreulicherweise zeigte, kann die Verdünnung durch Anheben der in Bodennähe herrschenden axialen Strömungsgeschwindigkeit gefördert und damit die Größe des explosionsfähigen Bereiches innerhalb der Umschließung in erheblichem Maße reduziert werden. Für den hindernisfreien Tunnel ist ein höhenunabhängiges, turbulenzarmes Strömungsprofil bekannt, d. h. ein Hochfahren der Lüftung hat ein tunnelweites Anheben der Strömung zur Folge – also auch in der die Schwergasausbreitung bestimmenden Bodennähe. Anders verhält es sich möglicherweise bei stehendem Verkehr im Tunnel, wie bspw. die numerischen Untersuchungen von *Eftekharian* nahelegen [vgl. [44]]. Sollte sich in weitergehenden Untersuchungen bestätigen, dass das Hochfahren der deckenseitig angebrachten Strahlventilatoren bei Stau demnach lediglich die Strömung im Deckenbereich erhöht, im gesamten bodennahen Bereich aber hauptsächlich nur zu verstärkter Turbulenz und nicht etwa zur erwünschten Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt, würde infolge der Turbulenz zwar die laterale Verteilung der Wolke auf dem Boden unterstützt, wie sich insbesondere bei kleinerem  $Fr_{DT}$ -Verhältnis jedoch zeigte, ginge von dieser Maßnahme

dann aber nicht der erhoffte globale verdünnungsfördernde Effekt aus. Insofern sollte diesem Aspekt zukünftig vorrangig Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Aus Projektierungssicht erwächst aus diesen Überlegungen sodann gleichzeitig die Frage nach dem bei Schwergasfreisetzungen effektivsten Lüftungskonzept unter den realen hindernisbehafteten Bedingungen im Tunnel. Dazu sollte der durch Strahlventilatoren induzierten mechanischen Längslüftung die Halbquer- sowie Querlüftung hinsichtlich ihres Vermögens unter Staubbedingungen die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit anzuheben und damit letztlich die Verdünnung zu fördern in weiteren Untersuchungen gegenübergestellt werden. Aus technischer Sicht gilt es hier einen guten Kompromiss zu finden zwischen Erfüllung der vorrangigen Aufgabe der Brandrauchführung bei gleichzeitiger Fähigkeit in adäquater Weise auf die verschiedenen sich bodennah ausbreitenden Gase reagieren zu können. Generell sollte sich mit Nachdruck der weiteren Charakterisierung der Tunnelströmung gewidmet werden. Wie die wenigen vorhandenen Literaturquellen verdeutlichen, sind die Strömungsverhältnisse im Straßentunnel aktuell noch zu unbestimmt, um die Ausbreitung von Stoffbeimengungen verlässlich vorauszusagen. Die Charakterisierung ist aufgrund der verschiedenen Lüftungskonzepte, die verbreitet sind, freilich eine umfangreiche Aufgabe.

In den Experimenten wurden sowohl das Tunnelsegment, also auch das zugrundeliegende Szenario samt involvierter Fahrzeuge stark abstrahiert. Umso stärker man sich wieder den realen Gegebenheiten im Straßentunnel annähert, desto mehr Parameter ergeben sich, die Einfluss auf die Ausbreitung nehmen können, und desto spezifischer kann die Fragestellung werden. So ist gerade in Bezug auf die Personenrettung von Interesse, ob das von der Tunnellängsströmung durch den Tunnel bewegte Schwergas das Bestreben hat, sich in strömungsgeschützten Bereichen wie den in regelmäßigem Abstand angeordneten Nothaltebuchten, die der Fluchttrettung dienen, bzw. allgemein hinter Vorsprüngen zu sammeln.

Zudem blieb aufgrund des generischen Ansatzes bei der Hindernisform unberücksichtigt, dass anders als bspw. bei Gebäuden prinzipbedingt bei Fahrzeugen eine je nach Typ mehr oder weniger große Bodenfreiheit gegeben ist, die es der Strömung erlaubt, mit Ausnahme der Bereiche der Räder unter dem Fahrzeugboden entlangzuströmen. Strömungsseitig könnte dieses Detail eine bessere Belüftung des fahrzeugrückwärtigen Totwassergebietes zur Folge haben; ausbreitungsseitig vergrößert dies in jedem Fall aber den zur Verfügung stehenden Raum der sich ausbreitenden Wolke bodennah. Womöglich verändert sich damit die Art des Einflusses, den Fahrzeuge auf die Ausbreitung nehmen können. Sollte sich dieser Effekt als bedeutsam herausstellen, muss zukünftig bei der Nachbildung einer strukturierten Stauanordnung der zusätzliche Freiraum Berücksichtigung finden.

Auch wenn einige Faktoren die Verdünnung im Tunnel fördern, einige sie hemmen geht die größte Gefahr bei der Ausbreitung brennbarer Gase letztlich von einer erfolgten Zündung der Bereiche, die explosionsfähig sind, aus. Ausstehend sind diesbezüglich Zündversuche, die zeigen, inwieweit sich die dünne Schicht explosionsfähiger Zusammensetzung in der bodennahen Wolke – ob in Gänze oder zumindest teilweise – entzünden lässt und sich wie angenommen ein Flächenbrand mit den beschriebenen Folgen entwickelt.

Abschließend sei in Erinnerung gerufen, dass mit der allgemeinen Zunahme gasförmiger Stoffe auf der Straße neben permanenten Schwergasen, denen das verwendete Propan zugerechnet wird, auch andere brennbare Gase in den Tunnel eingeführt werden, die nur anteilig, nämlich ausschließlich unter tiefkalten Bedingungen, Schwergasverhalten zeigen, womit sich das Ausbreitungsverhalten ändern kann. So ist aus numerischen Studien zur Ausbreitung von LNG in tunnelartigen Umschließungen bekannt (siehe [43] und [86]), dass sich das unter den kryogenen Bedingungen anfänglich gegebene Schwergasverhalten aufgrund des von den Tunnelwänden ausgehenden Wärmeeintrags in die Wolke nach kurzer Entfernung auflöst, die Wolke anschließend entlang der Tunnelwände hoch an die Tunneldecke steigt und sich dort der Großteil der explosionsfähigen Atmosphäre befindet statt am Boden. Dies gilt es experimentell zu bestätigen. Bei jenen Gasen dürfte dann auch die Frage nach dem Einfluss eines von der Gewölbeform abweichenden Tunnelquerschnitts (der Rechteckquerschnitt) an Bedeutung gewinnen.

Ein grundsätzlich anderes Ausbreitungsverhalten als bei Propan wird alsdann erwartet, wenn brennbare Gase, wie bei Erdgas oder Wasserstoff vorkommend, statt verflüssigt alternativ weiterhin gasförmig unter hohem Druck (z. B. bis 700 bar) gespeichert transportiert werden. So sind sie bei Freisetzung ihren thermodynamischen Bedingungen nach Leichtgase, besitzen also positiven Auftrieb. Durch die Druckdifferenz zur Umgebung würden sie sich zusätzlich stark impulsbehaftet ausbreiten. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nicht auf jene Situationen übertragbar.

## Literaturverzeichnis

- [1] 14. ADAC Tunneltest, ADAC, 2015. [Online]. URL: [https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/tunneltest\\_2015.aspx?ComponentId=242763&SourcePageId=6729](https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/tunneltest_2015.aspx?ComponentId=242763&SourcePageId=6729)
- [2] *Anzahl der Lastkraftwagen in Deutschland nach Kraftstoffarten in den Jahren 2021 bis 2023*, 23. Mai 2023 ed., Kraftfahrtbundesamt. [Online]. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/468860/umfrage/lkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/>.
- [3] *BG-Regel 100-500 Betreiben von Arbeitsmitteln*, BGR 500 2.31, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008. [Online]. URL: <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-regeln/997/betreiben-von-arbeitsmitteln-nur-online>
- [4] Chapter 15 - Emission and Dispersion, in *Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Fourth Edition)*, MANNAN, S. Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 752-1074.
- [5] *CHEMSAFE - Datenbank für Sicherheitstechnische Kenngrößen im Explosionsschutz*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Fachbereich 3.7; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Fachbereich 2.1. [Online]. URL: <https://www.chemsafe.ptb.de/de.html>.
- [6] *Datasheet\_uSonic-3-Scientific*, METEK GmbH, Elmshorn. [Online]. URL: [https://metek.de/de/wp-content/uploads/sites/6/2015/12/Datasheet\\_uSonic-3-Scientific.pdf](https://metek.de/de/wp-content/uploads/sites/6/2015/12/Datasheet_uSonic-3-Scientific.pdf).
- [7] *DIN 1076 : Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen ; Überwachung und Prüfung*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1999. [Online]. URL: [https://subversion.mpg.de/repos/hosting/beuth/DIN\\_1076\\_11-1999.pdf](https://subversion.mpg.de/repos/hosting/beuth/DIN_1076_11-1999.pdf)
- [8] *Dräger PIR 7000/ PIR 7200 - Infrarot Gastransmitter - Technisches Handbuch* Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck.
- [9] *Explosionsschutz - Gaswarnsysteme*, Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck, 2017. [Online]. URL: <https://www.draeger.com/Products/Content/ExSchutz-Gaswarnsysteme-9046261-de-master.pdf>.
- [10] *Lüftung der Strassentunnel: Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung*, BUNDESAMT FÜR STRASSEN ASTRA, A. S. N. 13001, 2008. [Online]. URL: [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch)
- [11] *Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten von 2017 bis 2023* 8. März 2023 ed., Kraftfahrtbundesamt. Zugriff: 2. September 2023. [Online]. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4270/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/>.
- [12] *Planunterlagen zu PlaPB 800.500, Tunnel BAU*, Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG), 2018. [Online]. URL: <https://www.asfinag.net/media/1991/plapb-8005001500-tunnel-regelplaene-v700.pdf>.

- [13] *Produktdatenblatt Propan (nach DIN51622)*, Linde GmbH, Pullach. [Online]. URL: [https://produkte.linde-gase.de/schneid\\_und\\_schweissgase/gase\\_zum\\_thermischen\\_trennen/propan\\_DIN51622.html](https://produkte.linde-gase.de/schneid_und_schweissgase/gase_zum_thermischen_trennen/propan_DIN51622.html).
- [14] *Richtlinie für die Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln (RABT)*, FGSV-Nr.: 339, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), 2006.
- [15] *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)*, FGSV-Nr.: 202, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2008.
- [16] *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)*, FGSV-Nr.: 201, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2012.
- [17] *SI Brochure: The International System of Units (SI)*, Bureau International des Poids et Mesures, 2019. [Online]. URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>
- [18] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 26. November 2019 (BGBl. I S. 2015) geändert worden ist.* [Online]. URL: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de)
- [19] Thesenpapier: Abstandsfestlegungen für Anlagen und Betriebsbereiche, die dem Störfallrecht unterliegen – Situation, Anforderungen und Möglichkeiten, TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG 2016.
- [20] *VDI 3783 Blatt 12 Umweltmeteorologie – Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht – Windkanalanwendungen*, Fachbereich Umweltmeteorologie, VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss 2000.
- [21] *VDI Richtlinie 3783 Blatt 2 - Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen schwerer Gase - Sicherheitsanalyse*, Verein Deutscher Ingenieure, Fachbereich Umweltmeteorologie, 1990.
- [22] Schweizerischer Bundesrat SR 814.012, *Verordnung über den Schutz vor Störfällen*. Fassung gemäß 1 September 2023. [Online] URL: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1991/748\\_748\\_748/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1991/748_748_748/de)
- [23] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau - Baudurchführung*, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2014.
- [24] 2010. *KAS-18 - Leitfaden Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung*.
- [25] ABRAMOVICH, G. N., *The Theory of Turbulent Jets*. The MIT Press, 2003.
- [26] BABUL, N., *Konzeption eines Modell-Windkanals zur experimentellen Untersuchung der Verdünnung brennbarer Gase in Verkehrstunneln*, Masterarbeit, Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Berlin, 2018.

- [27] BAKKE, P., LEACH, S. J., Methane Roof Layers, Ministry of Power, Safety in Mines Research Establishment, Sheffield, 1960, vol. Research Report No. 195. [Online]. URL: <https://books.google.de/books?id=ZyiKtgAACAAI>
- [28] BALTZER, W., RIEPE, W., ZIMMERMANN, U., ZULAUF, C., IMHOF, D., MAYER, G., Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009. [Online]. URL: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/253>
- [29] BARLOW, J. B., RAE, W. H., POPE, A., *Low-speed wind tunnel testing*. New York: Wiley, 1999.
- [30] BARTKNECHT, W., ZWAHLEN, G. N., *Explosionsschutz Grundlagen und Anwendung*. Springer, 1993.
- [31] BETTELINI, M., Frischer Wind im Tunnel: Grundlagen und aktuelle Entwicklungen für die Lüftung von Strassentunnels, *Tec21*, vol. 129, no. 48, 2003.
- [32] BRITTER, R. E., MCQUAID, J., Workbook on the dispersion of dense gases, Health and Safety Executive U.K., HSE Contract Research Report No. 17/1988, 1989.
- [33] BRITTER, R. E., SNYDER, W. H., Fluid modeling of dense gas dispersion over a ramp, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 18, no. 1, pp. 37-67, 1988.
- [34] CERMAK, J. E., ISYUMOV, N., *Wind tunnel studies of buildings and structures* ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1999.
- [35] COLELLA, F., REIN, G., CARVEL, R., RESZKA, P., TORERO, J. L., Analysis of the ventilation systems in the Dartford tunnels using a multi-scale modelling approach, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 423-432, 2010.
- [36] CONSIDINE, M., Risk assessments of the transportation of hazardous substances through road tunnels, präsentiert beim Recent advances in hazardous materials transportation research : an international exchange : papers presented at the conference Lake Buena Vista, November 10-13, 1985, 1985, S. 178-185.
- [37] CONSIDINE, M., PARRY, ST, BLYTHING, K, Risk assessment of the transportation of hazardous substances through road tunnels in the United Kingdom, no. CR139, 1989, p. 282.
- [38] DEVAULL, G. E., KING, J. A., LANTZY, R. J., FONTAINE, D. J., Low-Velocity Dense-Gas Releases, in *Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases*. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1995, pp. 28-30.
- [39] *DIN 1343: Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte*, DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen, Beuth Verlag GmbH, 1990. [Online]. URL: [http://slubdd.de/katalog?TN libero mab2](http://slubdd.de/katalog?TN%20libero%20mab2)
- [40] DONAT, J., Windkanalexperimente zur Ausbreitung von Schwergasstrahlen, Diss., Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg, Reihe A: Meteorologie, 24, 1996.

- [41] DUIJM, N. J., VAN ULDEN, A. P., VAN HEUGTEN, W. H. H., BUILTJES, P. J. H., Physical and Mathematical Modelling of Heavy Gas Dispersion — Accuracy and Reliability, in *Air Pollution Modeling and Its Application V*, DE WISPELAERE, C., SCHIERMEIER, F. A., GILLANI, N. V. Eds. Boston, MA: Springer US, 1986, pp. 665-683.
- [42] DUIJM, N. J., WEBBER, D. M., Dispersion in the Presence of Buildings, *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, vol. 7, no. 2, pp. 118-123, 1994.
- [43] EBERWEIN, R., Untersuchung der Gefährdung von Personen und Bauwerken in Folge des Versagens von LNG-Kraftstoffspeichern für Fahrzeuge in Tunneln, Diss., TU Berlin, 2020.
- [44] EFTEKHARIAN, E., DASTAN, A., ABOUALI, O., MEIGOLINEDJAD, J., AHMADI, G., A numerical investigation into the performance of two types of jet fans in ventilation of an urban tunnel under traffic jam condition, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 44, pp. 56-67, 2014.
- [45] ELLISON, T. H., TURNER, J. S., Turbulent entrainment in stratified flows, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 6, no. 3, pp. 423-448, 1959.
- [46] *ADR applicable as from 1 January 2019 - European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*, ECE/TRANS/275, 2018.
- [47] FELDBINDER. Tanksattelanhänger TSA 58.3-4 ADR. [https://www.feldbinder.com/de/tanksattelanhaenger-fuer-gefahrqueter\\_101/](https://www.feldbinder.com/de/tanksattelanhaenger-fuer-gefahrqueter_101/) (Zugriff: 03. Mai 2023).
- [48] GEHANDLER, J., KARLSSON, P., VYLUND, L., Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages, in "SP Rapport," 02845172 (ISSN), 2017 2017. Zugriff: 2017-03-13t11:05:54.900+01:00. [Online]. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-29101>
- [49] GIRMSCHEID, G., Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus, 3. überarb. und erw. Aufl. ed. Berlin: Wilhelm Ernst Sohn, Wiley, 2013.
- [50] GRÖBELBAUER, H.-P., Experimental study on the dispersion of instantaneously released dense gas clouds, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1995.
- [51] HAACK, A., SCHREYER, J., MEYEROLTMANN, W., BEYER, S., Brandschutz in Verkehrstunneln, STUVA/ STUVAtec GmbH Bonn, Forschungsauftrag FE 82.166/1999/B3 der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2000.
- [52] HALL, D. J., WATERS, R. A., Wind tunnel model comparisons with the thorney island dense gas release field trials, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 11, pp. 209-235, 1985.
- [53] HALL, R. C., Modelling of dense gas dispersion in tunnels, Health and Safety Executive, CRR 359/2001, 2001.
- [54] HARTWIG, S., *Schwere Gase bei Störfallfreisetzung - Grundlagen zur Strömungsmechanik bei Sicherheitsanalysen*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1989.
- [55] HAVENS, J., SPICER, T., Vapor Dispersion and Thermal Hazard Modeling, Chemical Hazards Research Center, University of Arkansas, 2006.

- [56] HEINRICH, M., SCHERWINSIKI, R., Propanfreisetzungen unter praxisnahen Bedingungen - Ermittlung von Gaskonzentrationen mit und ohne Hindernisse, Techn. Überwachungs-Verein Norddeutschland, 1991.
- [57] HOSKER, R. P., JR., Methods for estimating wake flow and effluent dispersion near simple block-like buildings, NOAA-TM-ERL-ARL--108, 1981.
- [58] HUCHO, W.-H., *Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis*, 2nd ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [59] HUNT, J. C. R., ROTTMAN, J. W., BRITTER, R. E., Some Physical Processes Involved in the Dispersion of Dense Gases, Berlin, Heidelberg, 1984: Springer Berlin Heidelberg, in *Atmospheric Dispersion of Heavy Gases and Small Particles*, pp. 361-395,
- [60] INGASON, H., LI, Y. Z., LÖNNERMARK, A., *Tunnel Fire Dynamics*. New York: Springer, 2015.
- [61] *DER NEUE STRAHLIS NP - PURE POWER*, IVECO. [Online]. URL: [https://www.iveco.com/Germany/Neufahrzeuge/Documents/2018/0046\\_IV\\_Stralis\\_NP\\_460\\_Broschuere\\_DE\\_kleiner.pdf](https://www.iveco.com/Germany/Neufahrzeuge/Documents/2018/0046_IV_Stralis_NP_460_Broschuere_DE_kleiner.pdf). Zugriff: 09. Mai 2020.
- [62] JÄKEL, C., Entwicklung, Validierung und sicherheitstechnische Anwendung eines numerischen Ausbreitungsmodells für Flüssigwasserstoff, Diss., RWTH Aachen, 2018.
- [63] KLELL, M., EICHLSEDER, H., TRATTNER, A., *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4th ed. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018.
- [64] KO, G. H., KIM, S. R., RYOU, H. S., An Experimental Study on the Effect of Slope on the Critical Velocity in Tunnel Fires, *Journal of Fire Sciences*, vol. 28, no. 1, pp. 27-47, 2010.
- [65] KÖNIG-LANGLO, G., SCHATZMANN, M., Wind tunnel modeling of heavy gas dispersion, *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, vol. 25, no. 7, pp. 1189-1198, 1991.
- [66] KÖNIG, G., Windkanalmodellierung der Ausbreitung störfallartig freigesetzter Gase schwerer als Luft, Geophysikalische Institute, Universität Hamburg, Wittenborn, 1987.
- [67] KRÓL, M., KRÓL, A., KOPER, P., WRONA, P., Full scale measurements of the operation of fire ventilation in a road tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 70, pp. 204-213, 2017.
- [68] LEE, Y.-P., TSAI, K.-C., Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal*, vol. 53, pp. 35-42, 2012.
- [69] LIU, B., LIU, X., LU, C., GODBOLE, A., MICHAL, G., TIEU, A. K., Computational fluid dynamics simulation of carbon dioxide dispersion in a complex environment, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 419-432, 2016.
- [70] MARINESCU-PASOI, L., STURM, B., "Messung der Ausbreitung einer Wasserstoff- und Propanwolke in bebautem Gelände" und "Gasspezifische Ausbreitungsversuche", Batelle Ingenieurtechnik GmbH, R-68.202 u. R-68.264, 1994.

- [71] *Rechenprogramm VDISf2 zur VDI 3783 Blatt 2.* (1992). Meteorologisches Institut Universität Hamburg. [Online]. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/programme-zu-vdi-richtlinien/vdi-3783-stoerfallausbreitung>
- [72] MAROTZKE, K., Physikalische Modellierung der Ausbreitung störfallartig freigesetzter schwerer Gase zur Abschätzung von Gefahrenbereichen im bebauten Gelände, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg, 1993.
- [73] MARTINUZZI, R., TROPEA, C., The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 115, no. 1, pp. 85-92, 1993.
- [74] MERONEY, R. N., CFD prediction of dense gas clouds spreading in a mock urban environment präsentiert beim 5. International Symposium on Computational Wind Engineering Chapel Hill, North Carolina, USA, 23-27. Mai 2010.
- [75] MERONEY, R. N., Guidelines for fluid modeling of dense gas cloud dispersion, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 17, no. 1, pp. 23-46, 1987.
- [76] MICHEL, S. J., Feasibility Study of Heavy Gas Dispersion Experiments in Complex Environments in Physical Modelling, Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky, 2023.
- [77] MUZAMAL, M., Simulation of Gas Dispersion in Road Tunnels with Traffic, Masterarbeit, Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2011.
- [78] NIELSEN, M., Dense gas dispersion in the atmosphere, Risoe National Lab., Roskilde (Denmark). Wind Energy and Atmospheric Physics Dept.; Danmarks Tekniske Univ., Lyngby (Denmark), Denmark, RISO-R-1030(EN); Other: ON: DE99717254; ISBN 87-550-2362-2; TRN: DK9801661, 1998.
- [79] OECD/PIARC, Safety in Tunnels - Transport of dangerous Goods through Road Tunnels, 2001.
- [80] PROCESSNET, Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie, DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2017.
- [81] *Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz* 2004.
- [82] RAUCHEGGER, C., Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Schwergasfreisetzung und -ausbreitung, Diss., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2013.
- [83] ROBERTS, P. J. W., WEBSTER, D. R., Turbulent Diffusion, Environmental fluid mechanics: theories and applications, SHEN, H. H., Ed. New York: American Society of Civil Engineers, 2002.
- [84] *LPG Tankwagen und ISO Tankcontainer*, KADATEC s.r.o., Zdislavice. [Online]. URL: [www.kadatec.cz/wp-content/uploads/2017/11/LPG\\_Tankwagen.pdf](http://www.kadatec.cz/wp-content/uploads/2017/11/LPG_Tankwagen.pdf). Zugriff: 03. Mai 2023.

- [85] SCARGIALI, F., GRISAFI, F., BUSCIGLIO, A., BRUCATO, A., Modeling and simulation of dense cloud dispersion in urban areas by means of computational fluid dynamics, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 197, pp. 285-293, 2011.
- [86] SCHARFF, E., Verflüssigtes Erdgas (LNG) als Antriebsquelle im Schwerlastverkehr: Eine Sicherheitsbetrachtung am Referenzfall „Verkehrstunnel“, in *5. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag*, Magdeburg, Germany, 23. März 2017, pp. 1-13, [Online]. URL: <http://dx.doi.org/10.978.300/0562013>
- [87] SCHIEFER, H., *Statistik für Ingenieure: Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis*, 1st ed. 2018 ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [88] SCHMÖLZER, G., Tunnellüftungsanlagen und deren Regelung Messungen und Untersuchungen für eine erfolgreiche Inbetriebnahme, Diss., TU Graz, 2016.
- [89] SCHNATZ, G., HARTWIG, S., *Schwere Gase - Modelle, Experimente u. Risikoanalyse*. Berlin: Springer, 1986.
- [90] SCHÜTZ, T., Hrsg. *Hucho - Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort* (ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2316-8?nosfx=y>.
- [91] *Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel*, STRAßENWESEN, B. F., 2007.
- [92] SNYDER, W. H., Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 3, no. 1, pp. 113-134, 1972.
- [93] STAN, C., *Direkteinspritzsysteme für Otto- und Dieselmotoren*, 1st ed. 1999 ed. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999.
- [94] STEEN, H., BEHREND, E., *Handbuch des Explosionsschutzes*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.
- [95] THOMAS, P., The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, in "Fire Research Notes," Fire Research Station, Boreham Wood, 1968, vol. 723.
- [96] TOWNSEND, A. A., *The structure of turbulent shear flow* 2nd ed. Cambridge and New York: Cambridge University Press 1976.
- [97] TRUCHOT, B., OUCHERFI, M., QUEZL-AMBRUNAZ, F., DUPLANTIER, S., FOURNIER, L., WAYMEL, F., Are the tunnel ventilation systems adapted for the different risk situations ?, in *4. International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS2010)*, Frankfurt, Germany, 17.-19. März 2010, pp. 471-482, [Online]. URL: <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973557>
- [98] VAITKEVICIUS, A., COLELLA, F., CARVEL, R., Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires, *Fire Technology*, vol. 52, no. 5, pp. 1619-1628, 2016.
- [99] VAN BASSHUYSEN, R., SCHÄFER, F., Hrsgg. *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven* (ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017. [Online]. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-10902-8?nosfx=y>.

- [100] VAN HEUGTEN, W. H. H., DUIJM, N. J., Some findings based on wind tunnel simulation and model calculations of Thorney Island trial No. 008, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 11, pp. 409-416, 1985.
- [101] WEERHEIJM, J., VAN DEN BERG, A. C., Explosion risks and consequences for tunnels, in *Proceedings from the 6th International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS)*, Marseille, France, 12-14 März 2014 2014, pp. 50-63,
- [102] WHITE, B. R., Wind tunnel wake measurements of heavier-than-air gas dispersion near a two-dimensional obstacle, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 38, no. 1, pp. 105-124, 1987.
- [103] WOLF, J., Die neuen Entwicklungen der Technik - Elemente der Wasserstoff-Infrastruktur von der Herstellung bis zum Tank, präsentiert beim Medienforum Deutscher Wasserstofftag - eine Initiative des VDI Wissensforums und der Linde AG, 1. Oktober 2003. [Online]. URL: [https://www.linde-gas.de/de/images/WASSERSTOFFTAG-03\\_WOLF\\_HANDOUT\\_tcm565-71312.pdf](https://www.linde-gas.de/de/images/WASSERSTOFFTAG-03_WOLF_HANDOUT_tcm565-71312.pdf).
- [104] WÖRSDÖRFER, K., HARTWIG, S., Experimentelle Untersuchung über die Schwergasausbreitung mit Strömungshindernissen, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 61, no. 12, pp. 984-985, 1989.
- [105] ZINKE, R., Unsicherheitsbetrachtungen und Fehlerfortpflanzung in quantitativen Risikoanalysen, Habilitationsschrift, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, 2022. [Online]. URL: <http://dx.doi.org/10.25673/88131>

## Anhang

A1	Kalibrierung der Hitzdrahtanemometer .....	150
A2	Kalibrierung und Fehlerbetrachtung der PIR Gastransmitter .....	151
A3	Modellversuchsstand im versuchsbereiten Vollausbau .....	153
A4	Stauähnliche Hindernisanordnungen im Modelltunnel .....	154
A5	Vergleich Propan 2.5 zu UN1965 im Modellmaßstab .....	155
A6	Technische Zeichnung Großversuchsstand .....	156
A7	Strömungsbedingungen im Großversuchsstand .....	157
A8	Prozedere zur Füllung des Quellgefäßes für Großversuche.....	159
A9	Messstellenpläne Großversuchsstand .....	161
A10	PIR-Sensorzuordnung zu Konzentrationsmessstellen .....	162
A11	Datenübersicht zur Messung der Strömungsbedingungen im Modellversuchsstand.....	163
A12	Datenübersicht der Ausbreitungsversuche im Modellmaßstab .....	167
A13	Ergebnisse der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs.....	171
A14	Ermittlung der Nomogrammparameter aus Regressionskurven .....	180
A15	Ergebnis der Regression der Nomogrammparameter .....	183
A16	Datenübersicht der Versuche im Großversuchsstand .....	184
A17	Verlauf der Luftfeuchte und Umgebungstemperatur während Messkampagne im Großversuchsstand.....	199



## A1 Kalibrierung der Hitzdrahtanemometer

Der funktionale Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit  $u_{HDA}$  und Heizspannung  $E_{HDA}$  wird mit einem allgemeinen polynomischen Ansatz der Form

$$u_{HDA} = C_0 + C_1 \cdot E_{HDA} + C_2 \cdot E_{HDA}^2 + C_3 \cdot E_{HDA}^3 + C_4 \cdot E_{HDA}^4 \quad (A.1)$$

beschrieben. Die Koeffizienten  $C_0$  bis  $C_4$  der Regression sind in einem Kalibriervorgang zu bestimmen.

Die Kalibrierung wurde in der messsystemeigenen Kalibrierstation vorgenommen. In der Station wird ein definierter Luftstrom erzeugt, der durch eine Lochblende geleitet die Sonde anströmt. Zur Vermeidung von Fehlern bedingt durch Winkelfehlstellung ist auf eine orthogonale Ausrichtung der Sonde zur Blende zu achten. Der Hitzdraht ist zudem mittig zum Loch unmittelbar hinter dem engsten Querschnitt der Blende zu positionieren. Die Station misst separat in einer hochgenauen Messzelle die Geschwindigkeit des Luftstroms und ist in der Lage, den Strom in seiner Stärke zu variieren. Nach dem Start des Vorgangs werden vom Kalibrierprogramm automatisiert die über die Benutzeroberfläche eingegeben Kalibrierpunkte bzw. -geschwindigkeiten in einem iterativen Regelprozess aus Luftstrom messen und anpassen nacheinander angefahren.

Konkret wurde für die HDA im Modellversuchsstand gemäß Dimensionsanalyse ein Kalibrierbereich für die Geschwindigkeit von 0,05 bis 2 m/s gewählt, der mit einer Auflösung von 20 Punkten bei logarithmisch ansteigendem Abstand der Punkte zu durchfahren war.

Die auf diese Weise bestimmten Koeffizienten der HDA-Sensoren 1 bis 4 sind in Tabelle A-1 aufgeführt.

*Tabelle A-1: Regressionskoeffizienten der Hitzdrahtanemometer*

	<b>HDA 1</b>	<b>HDA 2</b>	<b>HDA 3</b>	<b>HDA 4</b>
C0	-85,546417	-57,082657	-58,094860	-54,770599
C1	202,895813	126,631180	129,523987	122,784081
C2	-173,201462	-96,057014	-98,743530	-94,200798
C3	59,967293	24,861517	25,685692	24,663166
C4	-6,119294	-0,000012	-0,000009	-0,000007

## A2 Kalibrierung und Fehlerbetrachtung der PIR Gastransmitter

Mit jeder Änderung des Messbereichs der Gastransmitter ist eine Neukalibrierung aller 20 Gastransmitter vorzunehmen. Zwischen dem Spannungssignal  $E_{PIR}$  des Gastransmitters und der Propankonzentration  $c_{PIR\_C3H8}$  herrscht ein linearer Zusammenhang der Form:

$$c_{PIR\_C3H8} = C_{PIR\_0} + C_{PIR\_1} \cdot E_{PIR} \quad (A.2)$$

Die Koeffizienten  $C_{PIR\_0}$  und  $C_{PIR\_1}$  sind mittels Zweipunktkalibrierung zu bestimmen. Für Konfiguration und Kalibrierung wird vom Hersteller die Software *Dräger PolySoft* bereitgestellt, welche strukturiert durch den Kalibrierprozess führt. Zur Kommunikation ist eine physische Verbindung über die gerätseitig vorhandene *HART*<sup>®</sup>-Schnittstelle mit dem Gastransmitter herzustellen. Die neuen Konfigurations- und Kalibrierdaten werden nach Abschluss des Vorgangs softwareseitig direkt auf den Gastransmitter übertragen und geräteintern gespeichert.

Die Kalibrierprozedur ist für jeden Gastransmitter einzeln vorzunehmen. Für die Nullpunktkalibrierung wurde der Gastransmitter in prüfgasfreier Raumluft betrieben. Zur Empfindlichkeitskalibrierung ist der Gastransmitter zusätzlich mit der dafür vorgesehenen Kalibrierhaube zu präparieren. Anschließend wurde ein 5 Vol-% Propan-Stickstoff-Gasgemisch bei einem Gasfluss von 1 l/min über die Anschlüsse an der Kalibrierhaube kontinuierlich der Messzelle zugeführt. Das Kalibriergemisch wurde dabei im Vornherein mit der am BAM-Standort befindlichen Gasmischanlage (in Haus 414) nach der Partialdruckmethode hergestellt. Für die Gesamtmesskette der in der Mischanlage integrierten Druckmessung wurde ein Fehler zu kleiner als 0,12 % vom Messbereich bei einer Auflösung von  $10^{-4}$  bar ermittelt. Die Beaufschlagung der Gastransmitter mit dem so erzeugten Kalibriergas wurde je Kalibrierkonfiguration mindestens für 5 min aufrechterhalten, jedoch mindestens, bis sich ein zeitstabiler Messendwert eingestellt hatte. Entsprechend diesem Prozedere wurden die Gastransmitter sowohl für die Groß- als auch Kleinversuche kalibriert. Für die Kleinversuche war eine separate Nullpunkt- und Empfindlichkeitskalibrierung erforderlich, da durch Präparierung des Gastransmitters mit dem Flowcell-Adapter eine Änderung der Länge der optischen Messküvette herbeigeführt wurde.

Die theoretische Betrachtung der Messunsicherheit ergibt: Der maximale Linearitätsfehler im Auslieferungszustand der Gastransmitter (ohne Flowcell-Adapter) ist mit kleiner 1,2 % der UEG bei einem Messbereich von 0 % bis 100 % der UEG ausgewiesen [8]. Bei konservativer Annahme skaliert der Fehler im Verhältnis der Erweiterung des Messbereiches. Für einen Messbereich bis 6 Vol-% ergibt sich folglich ein Fehler von 4,2 % der UEG bzw. 0,07 Vol-%; für die Kleinversuche unter Beachtung des Verstärkungsfaktors aufgrund der Dräger-Flowcell ein Messfehler von

17,6 % der UEG bzw. 0,3 Vol-%. Insbesondere bei geringen Propankonzentrationen kann eine Messabweichung in dieser Höhe generell nicht mehr vernachlässigt werden.

Die stichprobenartige Überprüfung für geringe Konzentrationen unter den Bedingungen des versuchsbereiten Kleinversuchsstands am Beispiel einer Propankonzentration von 0,8305 Vol-% ( $\pm 0,0083$  Vol-%) ergab in der Praxis indes eine deutliche kleinere Messabweichung der Gastransmitter von 0,07 Vol-% bzw. 4,1 % der UEG. Das Prüfgasgemisch aus Propan N25 und synthetischer Luft N50 wurde dabei einer Kalibrierflasche entnommen, welche BAM-intern vom Fachbereich 2.3 „Druckgeräte, Ausrüstungsteile, Gaswarngeräte“ zu diesem Zweck bereitgestellt wurde. Hierzu wurde das Prüfgas über einen Bypass zur Absaugpumpe (siehe Nadelventil V-112 in Abbildung 3-6) direkt in das Absaugsystem eingebracht. Ohne Betrieb der Absaugpumpe durchströmt das Prüfgas dementsprechend entgegengesetzt zur üblichen Absaugrichtung den Absaugtrakt und entweicht über die Absaugöffnung der Messstellen. Damit ließen sich gleichzeitig alle zehn Messküvetten im Absaugtrakt beaufschlagen und deren jeweilige Messabweichung über die Messwertvisualisierung an der Messwarte konnte abgelesen werden. Mit diesem Vorgehen war auf einfache Weise eine Nachprüfung der Messabweichung möglich. Zudem wurde dieses Verfahren in regelmäßigen Abständen über die gesamte Versuchskampagne wiederholt, um eine eventuelle Drift zu identifizieren bzw. die Messwertstabilität der Gastransmitter zu überprüfen.

### A3 Modellversuchsstand im versuchsbereiten Vollausbau

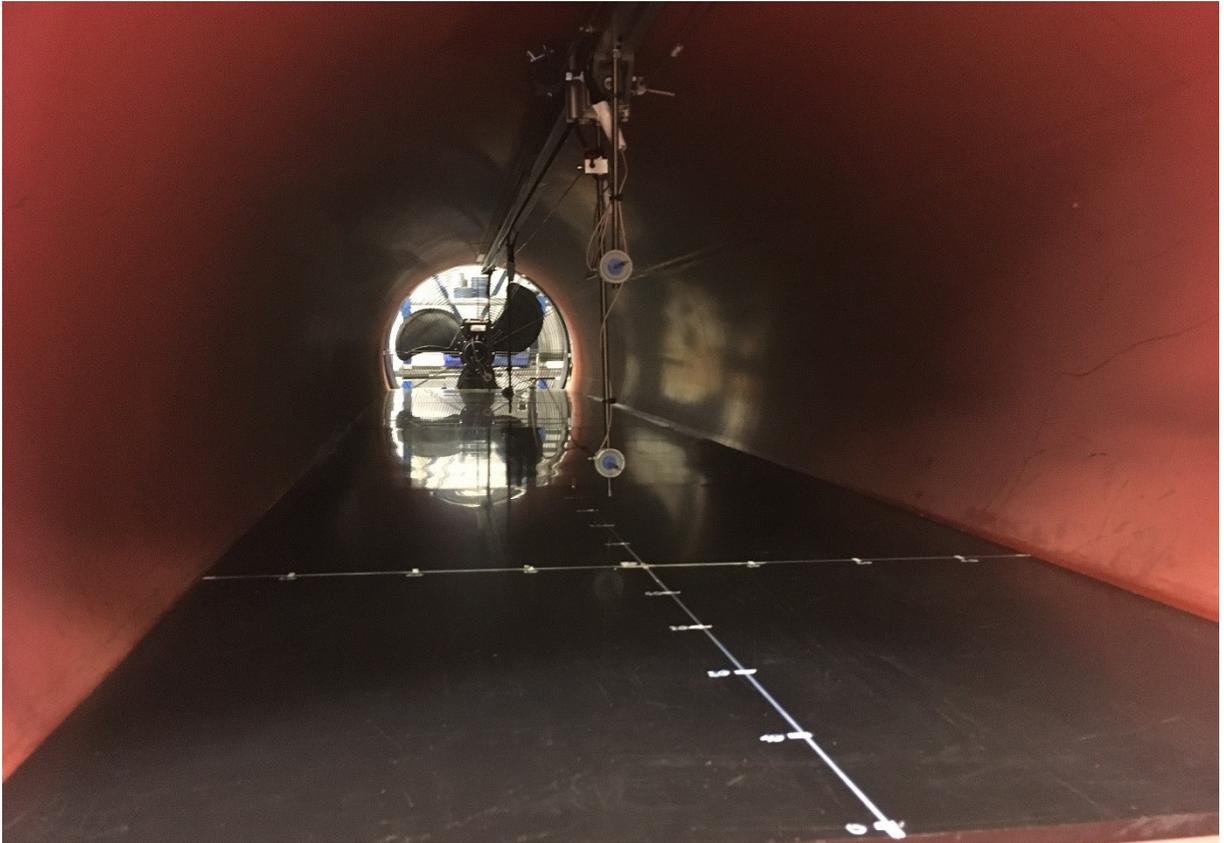


Abbildung A-1: Innenansicht des tunnelförmigen Versuchsgebiets mit mittig von der Firste abgespannten HDA und Ventilator im Hintergrund



Abbildung A-2: Außenansicht des Modellversuchsstands samt vollständiger Peripherie und Messplatz

## A4 Stauähnliche Hindernisanordnungen im Modelltunnel

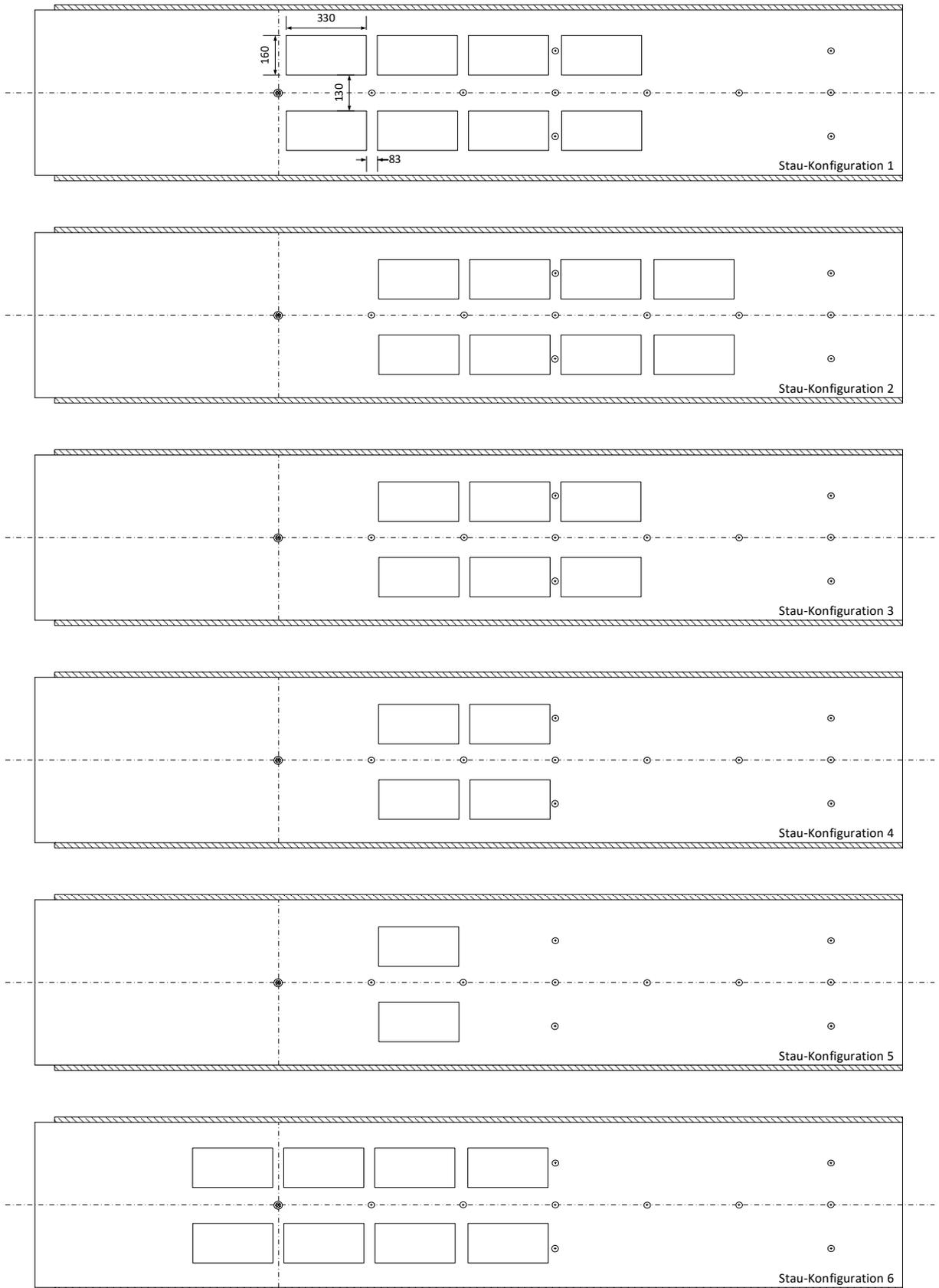


Abbildung A-3: Anordnung der Quaderhindernisse auf Bodenplatte bei Staukonfiguration 1 bis 6

## A5 Vergleich Propan 2.5 zu UN1965 im Modellmaßstab

Im Kleinversuchsstand wurde Propan 2.5 mit einer Reinheit von 99,5 % eingesetzt, im Großversuchsstand aus Kostengründen Propan nach DIN 51622 mit einer Reinheit von 95 %. Nach Produktdatenblatt des Herstellers besteht dieses aus einer Mischung von Propan und Propen, wobei mindestens 50 % davon Propan ist [13]. Um ausgehend hiervon sowohl eine Verfälschung des Messsignals durch Querempfindlichkeit der Gastransmitter als auch ein etwaig abweichendes Schwergasverhalten auszuschließen, die prinzipiell einer maßstäblichen Vergleichbarkeit entgegenstünden, wurde in Vorbereitung der Großversuche testweise Propan nach DIN 51622 ebenfalls im Kleinversuchsstand freigesetzt. Abbildung A-4 zeigt die Konzentrationsverläufe für beide Versuchsgasgemische am Beispiel von Sk 2. Eingezeichnet ist zudem die Standardabweichung für Sk 2. Für jeden Messpunkt zeigt sich, dass sich die beiden Konzentrationen jeweils nur geringfügig im Bereich der messtechnischen Streuung von Sk 2 voneinander unterscheiden. Somit resultiert aus der Wahl unterschiedlicher Versuchsgase keine Einschränkung in der Vergleichbarkeit.

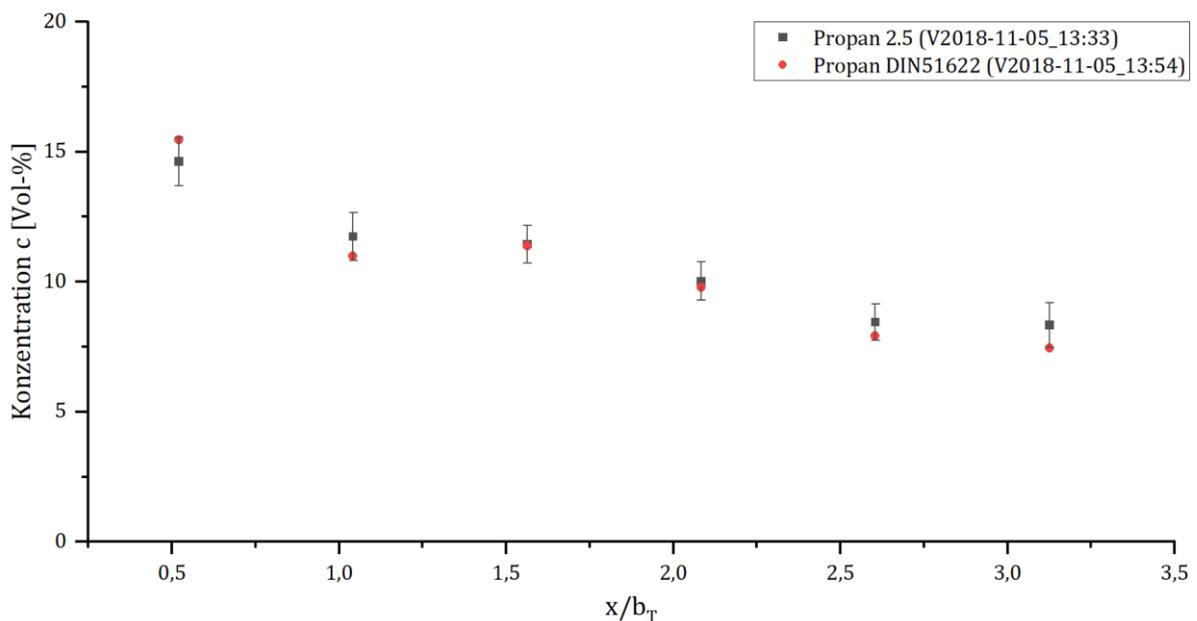


Abbildung A-4: longitudinaler Konzentrationsverlauf für Sk 2 bei Freisetzung von Propan 2.5 (in kleinmaßstäblichen Versuchen freigesetzt) und Propan nach DIN51622 (in Großversuchen verwendet)

# A6 Technische Zeichnung Großversuchsstand

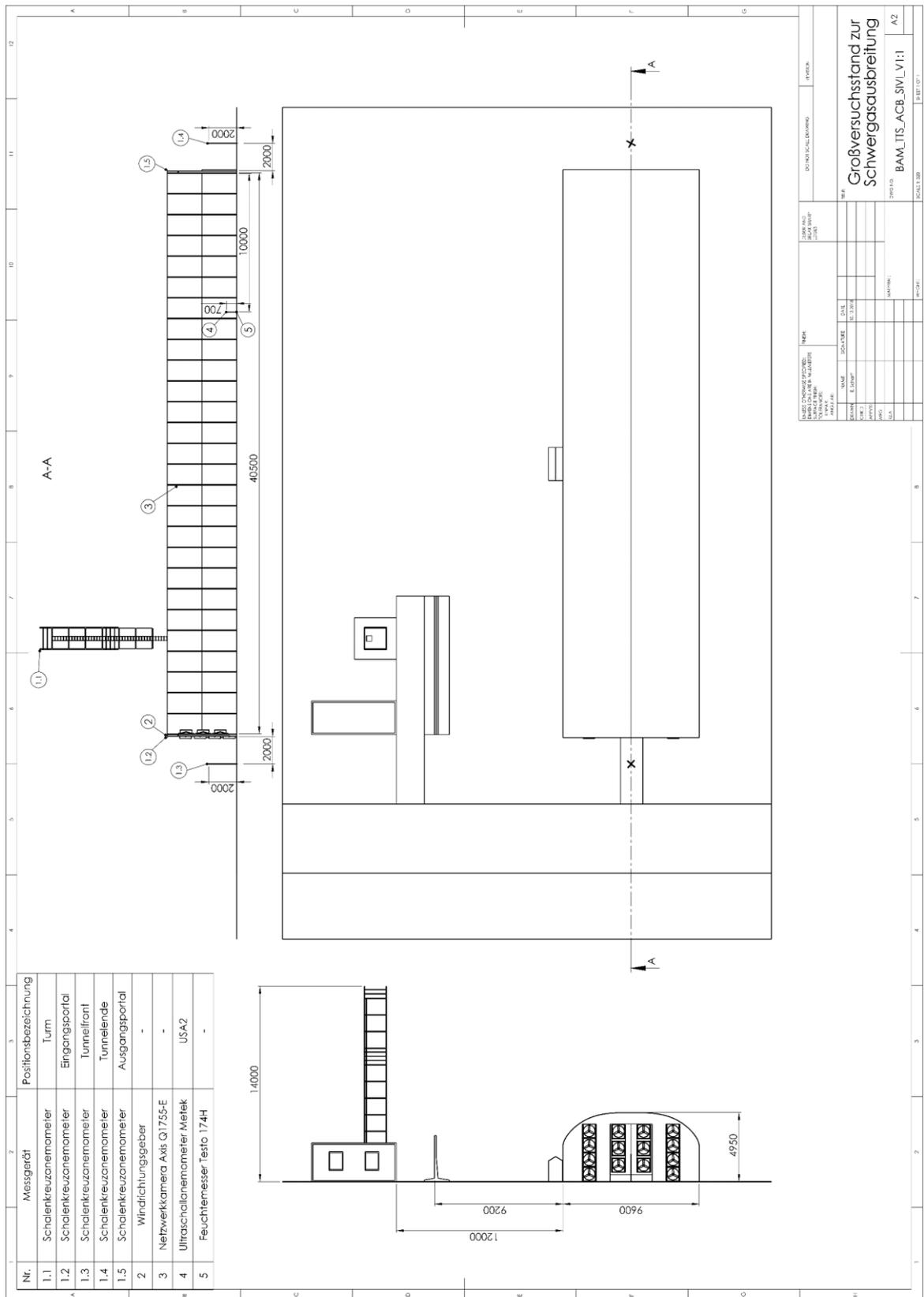


Abbildung A-5: Technische Zeichnung Großversuchsstand

## A7 Strömungsbedingungen im Großversuchsstand

Während im Großversuchsstand in axiale Richtung eine mittlere Strömung von ca. 0,5 m/s herrscht, sind den folgenden Abbildungen nach die Bewegungen lateral und vertikal turbulenzbedingt – eine effektive Strömung ist in jene Richtungen nicht gegeben.

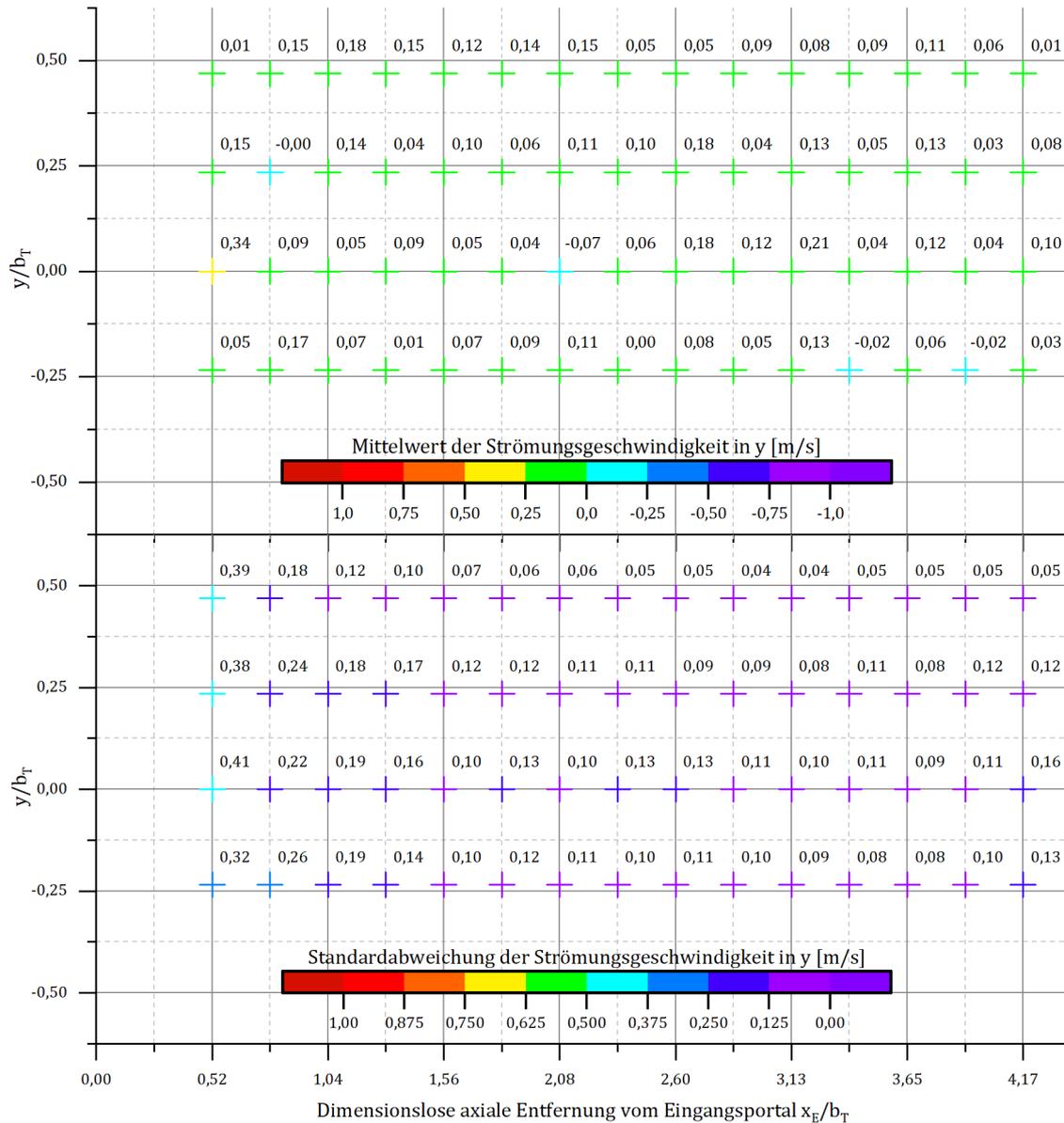


Abbildung A-6: Mittelwert (oben) und Standardabweichung (unten) der lateralen Strömungsgeschwindigkeit im Großversuchsstand bei 100 % der Ventilatorleistung

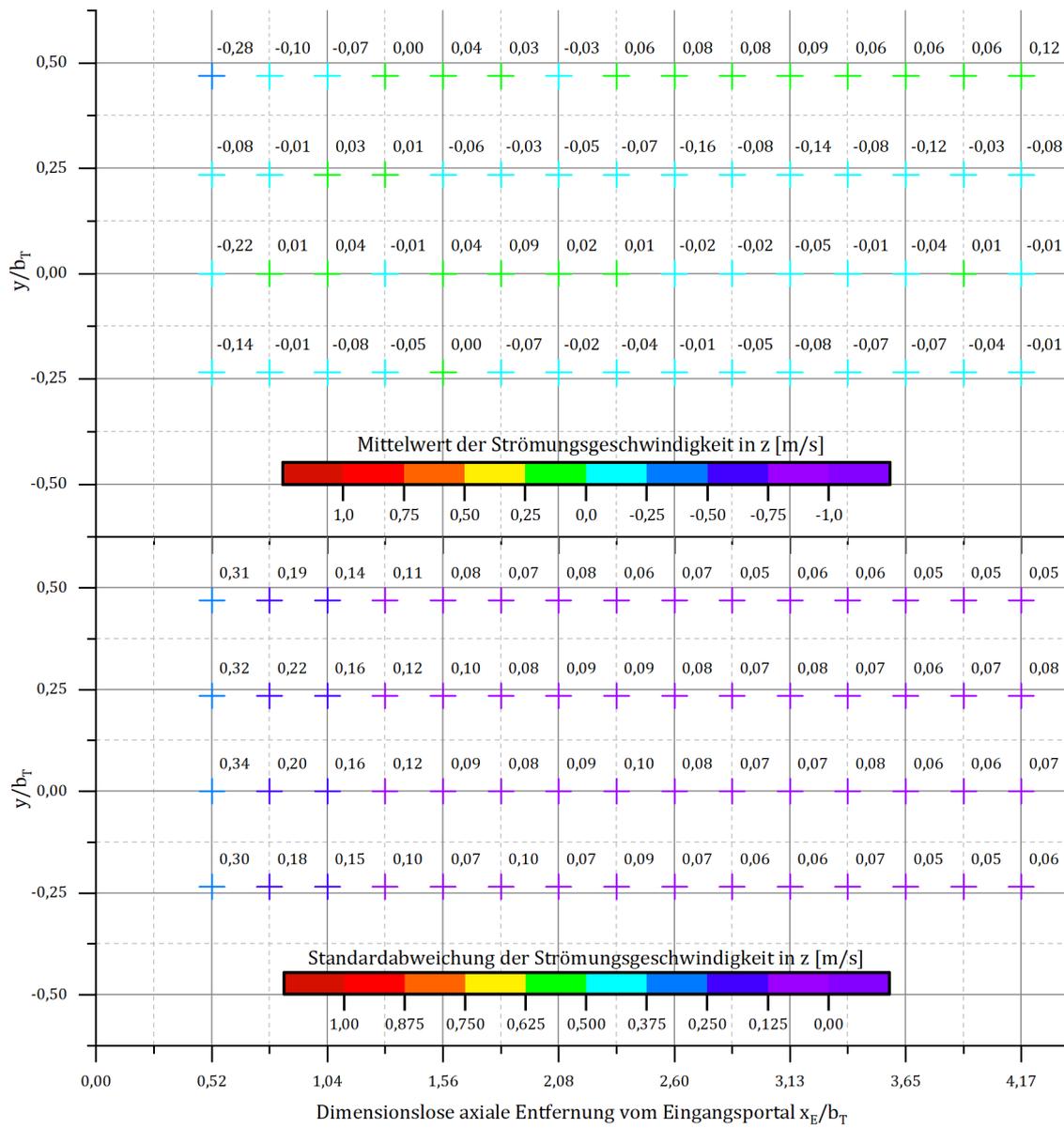


Abbildung A-7: Mittelwert (oben) und Standardabweichung (unten) der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit im Großversuchsstand bei 100 % der Ventilatorleistung

## A8 Prozedere zur Füllung des Quellgefäßes für Großversuche

Für den Großversuch war das Quellgefäß mit flüssigem Propan zu füllen. Hierzu wurde ein provisorischer Füllstand in der Nähe des Flaschenlagers des Prüfbereichs A, C, B (Haus 413) innerhalb des Versuchsgeländes de BAM eingerichtet, an den die mobile Quellversorgungseinrichtung angeschlossen werden konnte. In Abbildung A-8 ist schematisch die für die Füllstandanordnung bei mit dem Füllstand verbundenem Quellgefäß dargestellt.

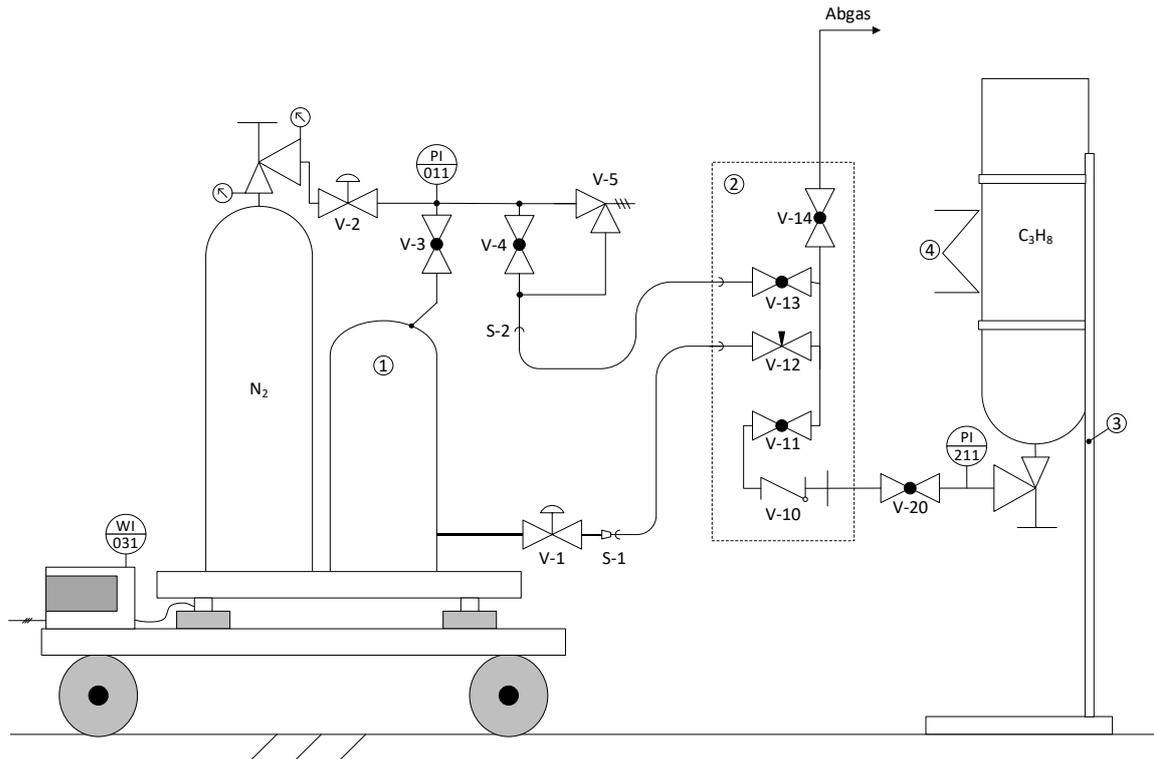


Abbildung A-8: Schematische Darstellung des Füllstands bei angeschlossener Quellversorgungseinrichtung; Puffergefäß (Pos. 1), Füllventilinsel (Pos. 2), Gasflaschenhalterung (Pos. 3), Heizmanschette (Pos. 4)

In Vorbereitung des Füllprozesses wurde aus dem Flaschenlager eine Propanflasche à 33 kg entnommen und kopfüber in eine Flaschenhalterung (Pos. 3) eingehängt, so dass am Flaschenventil flüssiges Propan anlag. Für den Füllprozess wurde die Quellversorgungseinrichtung über die Schraubverbindungen S-1 und S-2 mit dem Füllstand verbunden. Zum Überfüllen muss zwingend ein Druckgefälle von dem Reservoir zum zu füllenden Gefäß, dem Puffergefäß (Pos. 1), herrschen. Dies wurde erreicht, indem einerseits das Quellgefäß durch Abführen des Restgasinhalts über die Abgasleitung ins Freie auf annähernd Umgebungsdruck entspannt und andererseits das Flaschenreservoir mittels Heizmanschette (Pos. 4) ummantelt und über den Umfang auf Temperaturen bis maximal 50 °C vorgeheizt wurde.

Die Füllung wurde nach folgendem Prozedere vorgenommen:

1. Restentleeren eventueller Propanrückstände im Quellgefäß aus vorhergehendem Versuch durch Öffnen der Ventile V-1, V-12 sowie V-14 der Füllventilinsel (Pos. 2)
2. Anschließendes Spülen des Quellgefäßes mit Stickstoff, indem zusätzlich V-2 und V-3 geöffnet werden
3. Schließen aller Ventile
4. Nach angemessener Heizperiode der Flasche (Kontrolle des Flaschendruckes an Drucksensor 211 und der Druckdifferenz an Sensor PI011) Start des Füllprozesses durch Öffnen von Ventil V-20, V-11 und V-1 und Aufdrehen des Nadelventils V-12 (Füllrate kann über Nadelventil angepasst werden)
5. Die Füllmenge wurde per Waagenanzeige WI031 mitverfolgt. Bei stagnierender Füllmenge infolge zu geringen Druckgefälles wurde der Füllprozess unterbrochen und einerseits durch Nachheizen der Füllflasche und andererseits mit Reduzieren des Druckniveaus in der Pufferflasche durch kurzzeitiges Öffnen von V-3, V-4, V-13 und V-14 das Ausgangsdruckgefälle wiederhergestellt und anschließend die Füllprozedur fortgesetzt
6. Mit Erreichen der gewünschten Füllmenge Beendigung des Füllprozesses durch Schließen aller Ventile
7. Restentleeren der Füllleitungen durch Öffnen von V-12, V-13 sowie V-14

Hiermit war der Füllprozess abgeschlossen. Die Quellversorgungseinrichtung wurde durch Trennen der Schnittstellen S-1 und S-2 vom Füllstand abgekoppelt und im Anschluss zur Ausführung des Freisetzungsexperiments in das Versuchsgebiet verfahren.

## A9 Messstellenpläne Großversuchsstand

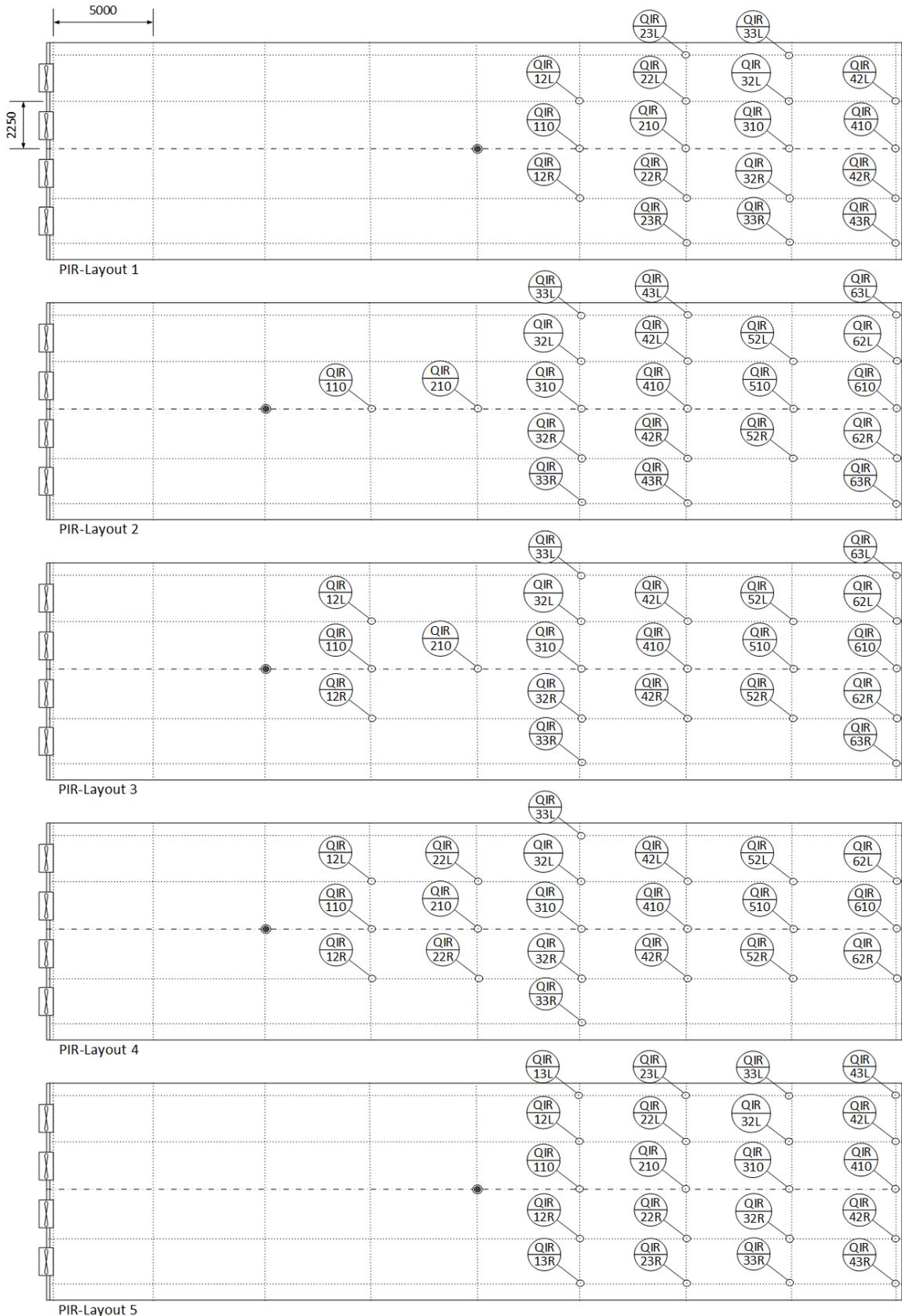


Abbildung A-9: Quellpositionen (schwarz gefüllter Kreis) und Konzentrationsmessstellen im Großversuch

## A10 PIR-Sensorzuordnung zu Konzentrationsmessstellen

<i>Sensorlayout</i>		<i>PIR-Layout 1</i>	<i>PIR-Layout 2</i>	<i>PIR-Layout 3</i>	<i>PIR-Layout 4</i>	<i>PIR-Layout 5</i>	<i>Modelltunnel</i>
<i>Messstelle</i>							
QIR13L	-	-	-	-	-	CoFi_1	-
QIR12L	SiVi_D1	-	CoFi_3	CoFi_3	SiVi_D1	-	-
QIR110	SiVi_D10	SiVi_D4	SiVi_D4	SiVi_D4	SiVi_D10	SiVi_D10	SiVi_D10
QIR12R	SiVi_D2	-	CoFi_6	CoFi_6	SiVi_D2	-	-
QIR13R	-	-	-	-	CoFi_2	-	-
QIR23L	CoFi_3	-	-	-	CoFi_3	-	-
QIR22L	CoFi_4	-	-	CoFi_7	CoFi_4	-	-
QIR210	SiVi_D9	SiVi_D3	SiVi_D3	SiVi_D3	SiVi_D9	SiVi_D9	SiVi_D9
QIR22R	CoFi_5	-	-	CoFi_10	CoFi_5	-	-
QIR23R	CoFi_6	-	-	-	CoFi_6	-	-
QIR33L	SiVi_D3	CoFi_1	CoFi_1	CoFi_1	SiVi_D3	-	-
QIR32L	SiVi_D6	SiVi_D1	SiVi_D1	SiVi_D1	SiVi_D6	SiVi_D6	SiVi_D6
QIR310	SiVi_D7	SiVi_D10	SiVi_D10	SiVi_D10	SiVi_D7	SiVi_D7	SiVi_D7
QIR32R	SiVi_D8	SiVi_D2	SiVi_D2	SiVi_D2	SiVi_D8	SiVi_D8	SiVi_D8
QIR33R	SiVi_D4	CoFi_2	CoFi_2	CoFi_2	SiVi_D4	-	-
QIR43L	-	CoFi_3	-	-	CoFi_7	-	-
QIR42L	CoFi_8	CoFi_4	CoFi_4	CoFi_4	CoFi_8	-	-
QIR410	SiVi_D5	SiVi_D9	SiVi_D9	SiVi_D9	SiVi_D5	SiVi_D5	SiVi_D5
QIR42R	CoFi_9	CoFi_5	CoFi_5	CoFi_5	CoFi_9	-	-
QIR43R	CoFi_10	CoFi_6	-	-	CoFi_10	-	-
QIR52L	-	SiVi_D6	SiVi_D6	SiVi_D6	-	-	-
QIR510	-	SiVi_D7	SiVi_D7	SiVi_D7	-	-	-
QIR52R	-	SiVi_D8	SiVi_D8	SiVi_D8	-	-	-
QIR63L	-	CoFi_7	CoFi_7	-	-	-	-
QIR62L	-	CoFi_8	CoFi_8	CoFi_8	-	SiVi_D1	-
QIR610	-	SiVi_D5	SiVi_D5	SiVi_D5	-	SiVi_D4	-
QIR62R	-	CoFi_9	CoFi_9	CoFi_9	-	SiVi_D3	-
QIR63R	-	CoFi_10	CoFi_10	-	-	-	-

Tabelle A-2: Sensorzuordnung zu Konzentrationsmessstellen im Groß- sowie Modellversuchsstand

## A11 Datenübersicht zur Messung der Strömungsbedingungen im Modellversuchsstand

Strömungs- messung Nr.	$x$ [m]	$x/b_T$	Messergebnisse an lateralen Positionen $y_1$ bis $y_4$								Messergebnisse zeitlich gemittelt		
			$\bar{u}_{y_1}$ [m/s]	$u_{RMS_{y_1}}$ [m/s]	$\bar{u}_{y_2}$ [m/s]	$u_{RMS_{y_2}}$ [m/s]	$\bar{u}_{y_3}$ [m/s]	$u_{RMS_{y_3}}$ [m/s]	$\bar{u}_{y_4}$ [m/s]	$u_{RMS_{y_4}}$ [m/s]	$\bar{u}_{S_{mess}}$ [m/s]	$\bar{u}_{RMS_{mess}}$ [m/s]	$Tu_{mess}$ [%]
V2018-11-27_x0.3	-0,7	-1,875	0,133	0,024	0,136	0,008	0,112	0,009	0,122	0,014	0,126	0,014	11,1
V2018-11-27_x0.4	-0,6	-1,75	0,156	0,040	0,150	0,025	0,129	0,022	0,113	0,027	0,137	0,028	20,7
V2018-11-27_x0.5	-0,5	-1,625	0,105	0,023	0,144	0,011	0,121	0,017	0,127	0,016	0,124	0,016	13,2
V2018-11-27_x0.6	-0,4	-1,5	0,154	0,028	0,147	0,013	0,140	0,017	0,116	0,023	0,139	0,020	14,6
V2018-11-27_x0.7	-0,3	-1,375	0,137	0,021	0,152	0,017	0,138	0,017	0,123	0,016	0,138	0,018	12,8
V2018-11-27_x0.8	-0,2	-1,25	0,137	0,020	0,157	0,016	0,136	0,015	0,126	0,021	0,139	0,018	13,1
V2018-11-27_x0.9	-0,1	-1,125	0,140	0,017	0,152	0,012	0,134	0,013	0,139	0,015	0,141	0,014	10,1
V2018-11-27_x1.0	0	-1	0,130	0,031	0,155	0,020	0,134	0,018	0,143	0,027	0,140	0,024	17,1
V2018-11-27_x1.1	0,1	-0,875	0,137	0,018	0,164	0,013	0,139	0,015	0,157	0,015	0,149	0,015	10,4
V2018-11-27_x1.2	0,2	-0,75	0,142	0,017	0,158	0,016	0,133	0,018	0,147	0,021	0,145	0,018	12,5
V2018-11-27_x1.3	0,3	-0,625	0,109	0,030	0,151	0,021	0,114	0,026	0,160	0,024	0,133	0,025	18,9
V2018-11-27_x1.4	0,4	-0,5	0,116	0,017	0,157	0,018	0,117	0,020	0,165	0,022	0,139	0,019	13,8
V2018-11-27_x1.5	0,5	-0,375	0,105	0,029	0,147	0,035	0,106	0,030	0,173	0,029	0,132	0,031	23,4
V2018-11-27_x1.6	0,6	-0,25	0,126	0,028	0,159	0,029	0,129	0,031	0,152	0,025	0,142	0,028	19,8
V2018-11-27_x1.7	0,7	-0,125	0,110	0,021	0,151	0,021	0,111	0,022	0,170	0,021	0,142	0,028	19,8
V2018-11-27_x1.8	0,8	0	0,108	0,023	0,135	0,020	0,102	0,021	0,147	0,017	0,123	0,020	16,6
V2018-11-27_x1.9	0,9	0,125	0,111	0,022	0,134	0,028	0,093	0,021	0,144	0,029	0,120	0,025	21,0
V2018-11-27_x2.0	1	0,25	0,106	0,031	0,143	0,027	0,106	0,028	0,156	0,022	0,128	0,027	21,1
V2018-11-27_x2.1	1,1	0,375	0,129	0,017	0,132	0,019	0,115	0,017	0,114	0,020	0,123	0,018	15,0
V2018-11-27_x2.2	1,2	0,5	0,126	0,015	0,134	0,016	0,114	0,014	0,134	0,015	0,127	0,015	11,8
V2018-11-27_x2.3	1,3	0,625	0,127	0,017	0,143	0,027	0,126	0,024	0,141	0,017	0,134	0,022	16,0
V2018-11-27_x2.4	1,4	0,75	0,127	0,016	0,121	0,025	0,124	0,017	0,131	0,019	0,126	0,019	15,3
V2018-11-27_x2.5	1,5	0,875	0,130	0,020	0,140	0,018	0,126	0,019	0,132	0,017	0,132	0,018	14,0
V2018-11-27_x2.6	1,6	1	0,139	0,018	0,139	0,019	0,129	0,016	0,132	0,020	0,135	0,018	13,4
V2018-11-27_x2.7	1,7	1,125	0,137	0,018	0,139	0,021	0,140	0,017	0,144	0,023	0,140	0,020	14,2

V2018-11-27_x2.8	1,8	1,25	0,132	0,017	0,141	0,018	0,125	0,017	0,150	0,021	0,137	0,018	13,3
V2018-11-28_x2.9	1,9	1,375	0,127	0,020	0,148	0,023	0,120	0,020	0,139	0,024	0,134	0,022	16,2
V2018-11-27_x3.0	2	1,5	0,119	0,016	0,109	0,019	0,088	0,018	0,113	0,017	0,107	0,017	16,3
V2018-11-27_x3.1	2,1	1,625	0,109	0,017	0,116	0,021	0,093	0,021	0,117	0,020	0,109	0,020	18,2
V2018-11-27_x3.2	2,2	1,75	0,126	0,015	0,131	0,033	0,111	0,023	0,125	0,033	0,122	0,019	15,4
V2018-11-27_x3.3	2,3	1,875	0,124	0,020	0,127	0,020	0,106	0,019	0,130	0,016	0,117	0,021	17,9
V2018-11-27_x3.5	2,5	2,125	0,124	0,019	0,133	0,023	0,095	0,021	0,118	0,021	0,117	0,021	17,9
Strömungsbedingungen im Modelltunnel im Mittel											0,131	0,021	15,8

*Tabelle A-3: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Standardabweichung an den Messpositionen  $y_1 = 0,468b_T$ ;  $y_2 = 0,234b_T$ ;  $y_3 = 0$ ;  $y_4 = -0,234b_T$  in einer Höhe  $z = 0,075b_T$  für unterschiedliche axiale Positionen  $x$  sowie daraus gemittelte Strömungsbedingungen im Modelltunnel*

Strömungs- messung Nr.	Hindernis	$\bar{u}_{s_{ziel}}$ [m/s]	Messergebnisse an longitudinalen Positionen $x_1$ bis $x_4$								Messergebnisse zeitlich gemittelt		
			$\bar{u}_{x_1}$ [m/s]	$u_{RMS_{x_1}}$ [m/s]	$\bar{u}_{x_2}$ [m/s]	$u_{RMS_{x_2}}$ [m/s]	$\bar{u}_{x_3}$ [m/s]	$u_{RMS_{x_3}}$ [m/s]	$\bar{u}_{x_4}$ [m/s]	$u_{RMS_{x_4}}$ [m/s]	$\bar{u}_{s_{mess}}$ [m/s]	$\bar{u}_{RMS_{mess}}$ [m/s]	$Tu_{mess}$ [%]
VS2018-10-18_13:42	kein	0,14	0,127	0,022	0,202	0,026	0,107	0,025	0,124	0,031	0,140	0,026	18,560
VS2018-10-18_14:32	kein	0,28	0,267	0,019	0,367	0,029	0,241	0,032	0,230	0,032	0,276	0,028	10,125
VS2018-10-18_15:13	kein	0,57	0,534	0,033	0,703	0,049	0,518	0,045	0,520	0,046	0,569	0,043	7,635
VS2018-10-22_13:22	kein	0,28	0,277	0,024	0,386	0,034	0,246	0,035	0,255	0,045	0,291	0,035	11,933
VS2018-10-22_15:03	kein	0,85	0,802	0,050	1,034	0,058	0,784	0,082	0,803	0,075	0,856	0,066	7,755
VS2018-10-22_15:28 <sup>1</sup>	kein	1,71	1,692	0,101	1,945	0,080	1,608	0,087	1,548	0,109	1,698	0,094	5,564
VS2018-10-24_14:42	kein	1,71	1,733	0,105	2,392	0,111	1,664	0,119	1,916	0,149	1,926	0,121	6,284
VS2018-10-29_10:43	kein	0,57	0,570	0,037	0,759	0,043	0,563	0,047	0,603	0,056	0,624	0,046	7,310
VS2018-10-29_14:05	kein	0,28	0,225	0,018	0,269	0,031	0,230	0,027	0,236	0,027	0,240	0,026	10,691
VS2018-11-15_11:00	kein	0,28	0,253	0,024	0,277	0,028	0,257	0,034	0,242	0,036	0,257	0,030	11,835
VS2018-11-15_11:05	kein	0,32	0,326	0,027	0,365	0,032	0,329	0,036	0,320	0,033	0,335	0,032	9,579
VS2018-11-15_11:15	kein	0,24	0,228	0,023	0,253	0,019	0,220	0,025	0,194	0,031	0,224	0,025	10,957
VS2018-11-23_13:13	kein	0,14	0,127	0,011	0,137	0,012	0,128	0,024	0,133	0,027	0,131	0,019	14,225
Messung 03 <sup>1,2</sup>	kein	maximale Ventilatorleistung	-	-	-	-	-	-	-	-	2,789	0,195	6,996

Tabelle A-4: Übersicht der Versuche zur Untersuchung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und Standardabweichung an den Messpositionen  $x_1 = -0,625b_T$ ;  $x_2 = 0$ ;  $x_3 = 1,5625b_T$ ;  $x_4 = 3,125b_T$  sowie daraus gemittelte Strömungsbedingungen im hindernisfreien Modelltunnel; <sup>1</sup> kein entsprechender Ausbreitungsversuch durchgeführt; <sup>2</sup> entnommen aus [26]

Strömungs- messung Nr.	Hindernis	Hindernisposition $x_{iH}$ [m]	$\bar{u}_{s,ziel}$ [m/s]	Messergebnisse an longitudinalen Positionen $x_1$ bis $x_4$							
				$\bar{u}_{x_1}$ [m/s]	$u_{RMS,x_1}$ [m/s]	$\bar{u}_{x_2}$ [m/s]	$u_{RMS,x_2}$ [m/s]	$\bar{u}_{x_3}$ [m/s]	$u_{RMS,x_3}$ [m/s]	$\bar{u}_{x_4}$ [m/s]	$u_{RMS,x_4}$ [m/s]
VS2018-10-24_15:24	Würfel	-0,5 (-0,625)	0,28	0,272	0,012	0,219	0,030	0,184	0,015	0,204	0,013
VS2018-10-26_13:20	Würfel	-0,2 (-0,25)	0,28	0,347	0,010	0,306	0,050	0,279	0,016	0,280	0,020
VS2018-10-26_13:24	Würfel	-0,3 (-0,375)	0,28	0,310	0,011	0,196	0,047	0,254	0,022	0,271	0,022
VS2018-10-26_13:31	Würfel	-0,4 (-0,5)	0,28	0,378	0,011	0,311	0,045	0,287	0,021	0,315	0,019
VS2018-10-26_13:41	Würfel	-0,2 (-0,25)	0,28	0,307	0,009	0,220	0,042	0,288	0,020	0,287	0,021
VS2018-10-26_14:00	Würfel	2 (2,5)	0,28	0,321	0,010	0,466	0,015	0,309	0,015	0,127	0,035
VS2018-10-29_13:17	Würfel	1,54 (0,675)	0,28	0,254	0,009	0,280	0,012	0,145	0,026	0,218	0,017
VS2018-10-30_12:02	Würfel	2,88 (3,6)	0,28	0,289	0,020	0,289	0,022	0,273	0,021	0,277	0,018
VS2018-11-16_14:21	Stau Konfiguration 1	s. Anhang A4	0,28	0,282	0,011	0,292	0,016	0,154	0,030	0,159	0,025
VS2018-11-16_14:48	Stau Konfiguration 1	s. Anhang A4	0,85	0,833	0,022	0,878	0,028	0,297	0,054	0,493	0,068
VS2018-11-19_11:30	Stau Konfiguration 3	s. Anhang A4	0,28	0,255	0,009	0,299	0,012	0,186	0,028	0,131	0,016
VS2018-11-19_11:39	Stau Konfiguration 4	s. Anhang A4	0,28	0,242	0,013	0,292	0,012	0,196	0,028	0,149	0,018
VS2018-11-19_11:48	Stau Konfiguration 5	s. Anhang A4	0,28	0,238	0,010	0,289	0,011	0,130	0,031	0,149	0,013
VS2018-11-19_12:14	Stau Konfiguration 6	s. Anhang A4	0,28	0,298	0,017	0,285	0,039	0,177	0,030	0,169	0,014
VS2018-11-23_12:05	Würfel	-0,2 (-0,25)	0,14	0,118	0,005	0,025	0,011	0,138	0,015	0,131	0,012

Tabelle A-5: Übersicht der Versuche zur Untersuchung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und Standardabweichung an den Messpositionen  $x_1 = -0,625b_T$ ;  $x_2 = 0$ ;  $x_3 = 1,5625b_T$ ;  $x_4 = 3,125b_T$  im hindernisbehafteten Modelltunnel; Werte in () als Vielfache von  $b_T$

# A12 Datenübersicht der Ausbreitungsversuche im Modellmaßstab

Versuch Nr.	$y_Q$ [m]	$z_Q$ [m]	Hinder- nis	$x_{IH}$ [m]	$\beta_T$ [%]	$\alpha_T$ [%]	$V_Q$ [l/min]	$\bar{u}_{s,ziel}$ [m/s]	$Fr_D$	$Fr_{DT}$	Bemerkungen	Zeitlicher Mittelwert der Konzentration $c$ [Vol-%]									
												QJR 110	QJR 210	QJR 32L	QJR 310	QJR 32R	QJR 410	QJR 510	QJR 62L	QJR 610	QJR 62R
V2018-10-18_13:42	0	0	kein	-	0	0	2,26	0,14 <sup>3</sup>	0,51	35		4,78	2,15	1,36	1,35	1,21	0,96	0,70	0,66	0,53	0,39
V2018-10-18_13:46	0	0	kein	-	0	0	6	0,14 <sup>3</sup>	0,42	19	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	10,94	5,83	3,24	4,02	3,90	3,18	2,51	2,18	2,23	2,43
V2018-10-18_13:52	0	0	kein	-	0	0	12	0,14 <sup>3</sup>	0,36	13	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	16,71	10,30	6,60	7,43	7,13	5,58	4,45	4,18	3,93	4,55
V2018-10-18_13:55	0	0	kein	-	0	0	24	0,14 <sup>3</sup>	0,32	8	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	17,06	13,92	11,76	12,59	11,58	10,78	8,65	8,17	7,85	8,82
V2018-10-18_14:02	0	0	kein	-	0	0	18	0,14 <sup>3</sup>	0,33	10	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	17,64	12,44	8,97	10,12	9,85	8,14	6,56	5,93	5,89	6,96
V2018-10-18_14:06	0	0	kein	-	0	0	48	0,14 <sup>3</sup>	0,27	6	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	15,39	13,09	13,21	13,45	13,10	12,88	11,17	11,93	11,11	12,00
V2018-10-18_14:09	0	0	kein	-	0	0	30	0,14 <sup>3</sup>	0,30	7	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	17,22	13,71	12,87	13,31	12,17	12,05	10,01	9,97	9,37	10,35
V2018-10-18_14:13	0	0	kein	-	0	0	36	0,14 <sup>3</sup>	0,29	7	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	16,32	13,75	13,24	13,67	12,74	12,53	10,61	10,89	10,08	11,13
V2018-10-18_14:16	0	0	kein	-	0	0	42	0,14 <sup>3</sup>	0,28	6	Strömung wie VS2018-10-18_13:42	16,45	12,97	13,37	13,38	12,62	12,72	11,00	11,55	10,76	11,64
V2018-10-18_14:32	0	0	kein	-	0	0	2,26	0,28 <sup>3</sup>	1,01	69		5,26	2,60	1,81	1,59	0,88	1,01	0,74	0,98	0,56	0,34
V2018-10-18_14:35	0	0	kein	-	0	0	6	0,28 <sup>3</sup>	0,83	39	Strömung wie VS2018-10-18_14:32	7,75	4,13	3,83	3,08	2,37	2,65	2,26	2,10	1,97	1,50
V2018-10-18_14:39*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Strömung wie VS2018-10-18_14:32	10,90	9,06	5,64	6,90	4,57	5,42	4,04	3,20	3,45	3,41
V2018-10-18_14:42	0	0	kein	-	0	0	18	0,28 <sup>3</sup>	0,67	20	Strömung wie VS2018-10-18_14:32	13,55	11,71	6,84	9,27	7,94	7,40	5,48	4,16	4,88	5,49
V2018-10-18_14:45	0	0	kein	-	0	0	24	0,28 <sup>3</sup>	0,63	17	Strömung wie VS2018-10-18_14:32	13,71	12,49	8,45	10,23	9,29	8,33	6,32	5,33	5,75	6,61
V2018-10-18_14:48**	0	0	kein	-	0	0	36	0,28 <sup>3</sup>	0,58	13	Strömung wie VS2018-10-18_14:32	14,28	12,91	11,56	11,57	11,16	10,53	8,84	8,90	8,30	8,95
V2018-10-18_15:13	0	0	kein	-	0	0	36	0,57 <sup>3</sup>	1,19	27		14,47	8,31	7,56	6,25	3,59	6,19	5,52	3,86	4,50	2,25
V2018-10-18_15:16	0	0	kein	-	0	0	24	0,57 <sup>3</sup>	1,29	34	Strömung wie VS2018-10-18_15:13	11,85	5,44	6,89	3,96	2,37	3,62	3,69	3,61	3,49	1,26
V2018-10-18_15:19	0	0	kein	-	0	0	12	0,57 <sup>3</sup>	1,48	52	Strömung wie VS2018-10-18_15:13	8,99	4,21	3,49	2,76	2,50	1,91	1,41	1,93	1,14	1,23
V2018-10-18_15:23	0	0	kein	-	0	0	6	0,57 <sup>3</sup>	1,70	79	Strömung wie VS2018-10-18_15:13	7,84	3,27	2,26	1,91	1,08	1,20	0,79	1,14	0,57	0,47
V2018-10-18_15:26	0	0	kein	-	0	0	2,26	0,57 <sup>3</sup>	2,06	141	Strömung wie VS2018-10-18_15:13	4,86	2,10	1,55	1,14	0,46	0,75	0,51	0,78	0,36	0,22
V2018-10-22_13:22	0	0	kein	-	0	0	48	0,28 <sup>3</sup>	0,55	11		14,39	11,84	11,09	11,10	9,62	9,79	8,23	9,20	7,95	8,80
V2018-10-22_15:03	0	0	kein	-	0	0	2,26	0,85 <sup>3</sup>	3,08	211		2,16	0,51	0,72	0,23	0,02	0,12	0,09	0,25	0,05	0,02
V2018-10-22_15:07	0	0	kein	-	0	0	6	0,85 <sup>3</sup>	2,53	117	Strömung wie VS2018-10-22_15:03	3,47	1,00	1,59	0,56	0,02	0,35	0,21	0,37	0,12	0,02
V2018-10-22_15:10	0	0	kein	-	0	0	12	0,85 <sup>3</sup>	2,20	77	Strömung wie VS2018-10-22_15:03	6,70	1,92	3,10	0,97	0,17	0,62	0,38	0,99	0,22	0,09
V2018-10-22_15:13	0	0	kein	-	0	0	18	0,85 <sup>3</sup>	2,03	61	Strömung wie VS2018-10-22_15:03	9,19	3,13	4,13	1,55	0,03	0,74	0,41	1,96	0,26	0,03
V2018-10-22_15:16	0	0	kein	-	0	0	24	0,85 <sup>3</sup>	1,92	51	Strömung wie VS2018-10-22_15:03	8,91	4,63	4,21	2,72	0,46	1,74	1,08	2,09	0,77	0,24
V2018-10-24_14:42	0	0	kein	-	0	0	2,26	1,71 <sup>3</sup>	6,19	424		0,22	0,06	0,23	0,03	0,02	0,04	0,03	0,06	0,03	0,02
V2018-10-24_14:51	0	0	kein	-	0	0	6	1,71 <sup>3</sup>	5,09	236	Strömung wie VS2018-10-24_14:42	1,59	0,50	0,23	0,24	0,02	0,17	0,11	0,12	0,06	0,03
V2018-10-24_14:54	0	0	kein	-	0	0	12	1,71 <sup>3</sup>	4,43	156	Strömung wie VS2018-10-24_14:42	2,43	0,71	1,13	0,35	0,02	0,22	0,14	0,31	0,10	0,06
V2018-10-24_14:57	0	0	kein	-	0	0	18	1,71 <sup>3</sup>	4,09	122	Strömung wie VS2018-10-24_14:42	2,39	0,51	1,59	0,22	0,03	0,15	0,10	0,35	0,06	0,04
V2018-10-24_15:00	0	0	kein	-	0	0	24	1,71 <sup>3</sup>	3,86	103	Strömung wie VS2018-10-24_14:42	2,91	0,62	1,55	0,30	0,02	0,23	0,15	0,70	0,11	0,02
V2018-10-24_15:04	0	0	kein	-	0	0	36	1,71 <sup>3</sup>	3,56	81	Strömung wie VS2018-10-24_14:42	3,70	0,77	2,72	0,33	0,04	0,20	0,15	0,63	0,11	0,05
V2018-10-24_15:07	0	0	kein	-	0	0	18	0,57 <sup>3</sup>	1,36	41		10,54	5,84	4,45	3,92	2,46	2,87	2,06	2,35	1,67	1,06
V2018-10-24_15:24	0	0	Würfel	-0,5 <sup>4</sup> (-0,625)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		9,33	6,53	4,21	4,82	3,68	3,83	3,02	2,71	2,69	2,61
V2018-10-26_13:20	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		1,26	0,89	1,45	0,79	1,56	0,94	0,94	0,94	0,85	1,30
V2018-10-26_13:24	0	0	Würfel	-0,3 (-0,375)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		2,38	1,13	1,35	0,95	1,61	0,90	0,89	0,94	0,88	1,03
V2018-10-26_13:31	0	0	Würfel	-0,4 (-0,5)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		5,17	2,27	3,16	1,83	2,13	1,82	1,56	1,57	1,41	1,21
V2018-10-26_13:41	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		1,18	0,89	2,00	0,86	1,44	0,92	0,97	1,28	0,99	1,23
V2018-10-26_13:55*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		11,80	6,68	6,51	6,28	2,30	5,47	4,02	3,36	3,42	2,56
V2018-10-26_14:00	0	0	Würfel	2 (2,5)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Hindernis verdeckt Absaugung zu QJR510	13,55	8,74	6,25	6,77	4,26	5,50	0,37 <sup>2</sup>	3,00	0,34	1,52
V2018-10-26_14:04*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		12,39	8,43	6,78	7,91	2,96	6,30	4,55	3,62	3,82	3,16
V2018-10-29_10:43	0	0	kein	-	0	0	48	0,57 <sup>3</sup>	1,12	23		16,63	10,98	9,93	8,67	3,51	6,81	6,99	5,29	6,73	2,53
V2018-10-29_11:55*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		15,67	10,56	5,67	7,83	4,95	5,85	4,26	3,46	3,67	3,86
V2018-10-29_13:17	0	0	Würfel	0,54 (0,675)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		15,72	1,30	6,64	1,14	2,73	2,08	2,57	3,69	2,45	2,01
V2018-10-29_14:05*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		17,59	10,40	3,73	6,85	7,22	5,43	4,35	3,39	4,12	4,30

Versuch Nr.	$y_Q$ [m]	$z_Q$ [m]	Hinder- nis	$x_{IH}$ [m]	$\beta_T$ [%]	$\alpha_T$ [%]	$V_Q$ [l/min]	$\bar{u}_{s,ziel}$ [m/s]	$Fr_D$	$Fr_{DT}$	Bemerkungen	Zeitlicher Mittelwert der Konzentration $\bar{c}$ [Vol-%]									
												QIR 110	QIR 210	QIR 32L	QIR 310	QIR 32R	QIR 410	QIR 510	QIR 62L	QIR 610	QIR 62R
V2018-10-30_12:02	0	0	Würfel	2,88 (3,6)	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		15,70	10,27	3,55	7,41	7,16	5,52	4,11	2,70	3,48	3,70
V2018-10-31_11:17	0	0	kein	-	3,5	0	12	0,28	0,73	25		16,38	8,73	2,64	5,41	6,53	4,04	3,05	1,85	2,62	3,68
V2018-10-31_11:20	0	0	kein	-	3,5	0	36	0,28	0,58	13		13,25	11,38	9,18	10,30	9,69	8,89	7,47	7,33	7,14	8,41
V2018-10-31_11:29	0	0	kein	-	7	0	12	0,28	0,73	25		16,89	6,76	1,87	3,95	6,68	3,06	2,61	0,96	2,72	4,38
V2018-10-31_11:31	0	0	kein	-	7	0	36	0,28	0,58	13		13,68	11,76	7,78	10,41	10,37	8,88	7,05	6,66	6,90	8,81
V2018-10-31_11:40	0	0	kein	-	-3,5	0	12	0,28	0,73	25		14,09	8,17	7,84	7,24	2,41	6,06	4,78	4,71	4,03	3,07
V2018-10-31_11:43	0	0	kein	-	-3,5	0	36	0,28	0,58	13		13,55	12,60	11,35	11,24	8,92	9,95	9,11	10,19	8,67	7,45
V2018-10-31_11:48	0	0	kein	-	-7	0	12	0,28	0,73	25		12,12	5,07	8,11	4,50	1,88	4,89	4,16	4,99	3,72	1,42
V2018-10-31_11:51	0	0	kein	-	-7	0	36	0,28	0,58	13		13,96	11,30	11,60	10,90	4,74	9,43	8,27	10,53	8,11	6,29
V2018-10-31_13:00*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		14,36	10,82	6,81	8,54	6,60	6,73	5,13	4,28	4,40	4,52
V2018-10-31_13:36	0	0	kein	-	0	2,5	12	0,28	0,73	25		12,52	7,81	7,30	7,92	4,75	6,59	5,17	4,25	4,38	4,05
V2018-10-31_13:39	0	0	kein	-	0	2,5	36	0,28	0,58	13		12,35	11,00	10,76	11,61	9,26	10,34	8,73	9,31	8,31	9,22
V2018-10-31_13:45	0	0	kein	-	0	5	12	0,28	0,73	25		13,42	8,39	6,63	6,14	5,49	5,18	4,41	4,32	4,09	3,75
V2018-10-31_13:48	0	0	kein	-	0	5	36	0,28	0,58	13		12,44	9,80	11,55	11,84	8,83	10,68	9,03	10,63	8,55	8,03
V2018-11-01_10:33*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		14,43	10,65	6,12	7,87	5,70	6,06	4,45	4,34	3,79	3,75
V2018-11-01_10:49	0	0,05 (0,0625)	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		5,46	4,22	3,21	3,22	2,88	2,47	2,02	2,61	2,05	2,16
V2018-11-01_10:53	0	0,05 (0,0625)	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		6,38	5,10	4,34	4,55	4,75	4,40	4,18	4,12	4,07	4,04
V2018-11-01_11:00	0	0,1 (0,125)	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		2,82	2,48	1,97	1,96	1,63	1,50	1,16	1,33	0,90	0,93
V2018-11-01_11:03	0	0,1 (0,125)	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		3,83	3,47	3,10	3,12	2,93	2,99	2,76	2,97	2,78	2,51
V2018-11-01_11:07	0	0,1 (0,125)	kein	-	0	0	36	0,85	1,77	40		0,63	2,40	2,40	2,51	0,94	2,18	1,82	2,06	1,63	1,41
V2018-11-01_11:12	0	0,15 (0,1875)	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		2,11	2,12	1,69	1,65	1,49	1,32	1,09	1,25	0,96	1,02
V2018-11-01_11:14	0	0,15 (0,1875)	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		2,96	2,92	2,62	2,54	2,48	2,40	2,32	2,39	2,28	2,24
V2018-11-01_11:19	0	0,15 (0,1875)	kein	-	0	0	36	0,85	1,77	40		0,14	0,89	1,40	1,22	0,36	1,14	1,04	1,26	0,88	0,66
V2018-11-01_11:50	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13	Versuchsstand in Backlayeringstellung (Messtellen sind stromauf der Quelle)	0,09	0,09	0,06	0,09	0,03	0,04	0,11	0,02	0,03	0,02
V2018-11-01_11:56	0	0	kein	-	0	2,5	12	0,28	0,73	25	Versuchsstand in Backlayeringstellung (Messtellen sind stromauf der Quelle)	0,08	0,08	0,06	0,08	0,02	0,03	0,09	0,02	0,03	0,02
V2018-11-01_11:58	0	0	kein	-	0	2,5	36	0,28	0,58	13	Versuchsstand in Backlayeringstellung (Messtellen sind stromauf der Quelle)	1,76	0,08	0,05	0,07	0,02	0,03	0,09	0,02	0,03	0,02
V2018-11-01_12:01	0	0	kein	-	0	5	12	0,14	0,36	13	Versuchsstand in Backlayeringstellung (Messtellen sind stromauf der Quelle)	17,57	11,06	6,34	8,35	8,35	4,83	2,55	0,41	0,33	0,05
V2018-11-01_12:10	0	0	kein	-	0	5	36	0,28	0,58	13	Versuchsstand in Backlayeringstellung (Messtellen sind stromauf der Quelle)	19,76	11,06	1,04	3,32	4,62	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02
V2018-11-01_12:12	0	0	kein	-	0	5	36	0,57	1,19	27	Versuchsstand in Backlayeringstellung (Messtellen sind stromauf der Quelle)	4,79	1,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
V2018-11-01_13:29†	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14	0,58	53		4,58	2,38	1,38	1,44	0,57	0,86	0,52	0,83	0,21	0,02
V2018-11-05_11:00**	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	1,13	0,14	0,58	53		0,38	0,25	0,42	0,18	0,18	0,14	0,18	0,28	0,11	0,12
V2018-11-05_11:47†	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14	0,58	53		4,30	1,83	1,54	1,02	0,38	0,63	0,45	0,72	0,28	0,09
V2018-11-05_13:33**	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		14,63	11,74	9,79	11,45	10,42	10,02	8,45	8,61	8,34	9,72
V2018-11-05_13:54	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13	Versuchsgas Propan UN 1965 statt Propan 2.5	15,46	10,98	9,48	11,38	9,00	9,77	7,91	8,22	7,45	9,01
V2018-11-08_10:57*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		12,53	6,88	6,04	6,78	4,35	5,75	4,41	3,73	3,86	3,26
V2018-11-08_11:00**	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		14,02	10,61	9,32	10,60	8,86	9,24	7,63	8,22	7,10	8,72
V2018-11-08_11:39	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25	Absaugung bei QIR110 und QIR510 um 0,05m (0,0625b <sub>1</sub> ) erhöht	0,36 <sup>1</sup>	6,00	6,70	7,45	2,96	6,11	0,65 <sup>1</sup>	3,62	3,88	3,40
V2018-11-08_11:42	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13	Absaugung bei QIR110 und QIR510 um 0,05m (0,0625b <sub>1</sub> ) erhöht	0,45 <sup>1</sup>	10,77	8,29	10,76	9,22	9,41	3,21 <sup>1</sup>	7,65	6,98	8,31

Versuch Nr.	$y_Q$ [m]	$z_Q$ [m]	Hinder- nis	$x_{IH}$ [m]	$\beta_T$ [%]	$\alpha_T$ [%]	$V_Q$ [l/min]	$\bar{u}_{s,z,ziel}$ [m/s]	$Fr_D$	$Fr_{DT}$	Bemerkungen	Zeitlicher Mittelwert der Konzentration $\bar{c}$ [Vol-%]									
												QIR 110	QIR 210	QIR 32L	QIR 310	QIR 32R	QIR 410	QIR 510	QIR 62L	QIR 610	QIR 62R
V2018-11-08_11:59	0	0	kein	-	0	0	36	0,85	1,77	40		12,50	5,59	5,23	3,30	2,80	2,00	1,32	1,73	0,98	1,26
V2018-11-08_12:37	0	0	kein	-	0	0	48	1,71	3,36	68		9,68	3,52	3,89	1,83	0,42	1,14	0,83	1,48	0,58	0,31
V2018-11-08_12:42	0	0	kein	-	0	0	48	0,85	1,67	34		14,54	7,78	8,30	5,06	3,99	3,35	2,30	4,74	1,76	1,98
V2018-11-08_12:46*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		13,19	7,79	7,20	7,71	4,57	6,33	4,92	4,16	4,19	3,77
V2018-11-08_12:49**	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		15,59	12,95	11,76	12,49	11,23	11,16	9,41	10,52	9,16	10,08
V2018-11-08_12:55	0,2 (0,25)	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		8,40	5,14	5,90	6,06	3,19	4,93	3,77	3,52	3,26	3,29
V2018-11-08_13:01	-0,2 (-0,25)	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		8,28	5,28	3,66	5,40	6,19	5,29	4,07	3,45	3,49	3,01
V2018-11-08_13:08	-0,34 (-0,425)	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		11,90	9,27	6,24	6,51	7,86	4,91	3,71	3,99	3,53	3,68
V2018-11-08_13:13	-0,34 (-0,425)	0	kein	-	0	0	12	0,57	1,48	52		0,31	4,48	1,04	3,49	4,01	2,53	1,90	1,35	1,56	2,00
V2018-11-08_13:25	0,34 (0,425)	0	kein	-	0	0	12	0,57	1,48	52		0,16	0,85	3,88	2,21	0,12	2,07	1,67	1,83	1,37	0,08
V2018-11-08_13:28	0,34 (0,425)	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		13,15	8,13	7,31	5,40	5,56	4,25	3,47	4,24	3,23	3,26
V2018-11-08_13:35*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		15,24	9,86	7,47	8,53	5,20	7,03	5,31	5,00	4,53	4,17
V2018-11-08_13:37**	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		12,92	12,24	12,39	12,05	10,94	10,85	9,14	11,18	9,21	9,23
V2018-11-09_11:46	0	0	Würfel	-0,1 (-0,125)	0	0	36	0,28	0,58	13		7,38	11,29	10,20	9,73	7,99	8,36	6,99	7,73	6,58	6,47
V2018-11-09_11:54	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	36	0,28	0,58	13		8,86	11,56	11,62	10,79	8,04	9,72	8,06	9,08	7,62	7,52
V2018-11-09_12:20	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	36	0,28	0,58	13	Absaugung bei QIR110 und QIR510 um 0,05 m (0,0625b <sub>i</sub> ) erhöht	1,36 <sup>1</sup>	11,70	11,59	11,19	7,87	9,69	3,20 <sup>1</sup>	9,04	7,21	6,91
V2018-11-09_12:24	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	12	0,28	0,73	25	Absaugung bei QIR110 und QIR510 um 0,05 m (0,0625b <sub>i</sub> ) erhöht	0,64 <sup>1</sup>	1,06	3,26	1,61	1,57	2,38	0,86 <sup>1</sup>	1,99	1,89	1,43
V2018-11-09_12:40	0	0	kein	-	0	-2,5	36	0,28	0,58	13		13,83	10,74	12,16	11,88	8,28	10,74	9,30	10,76	8,57	7,39
V2018-11-09_12:44	0	0	kein	-	0	-2,5	12	0,28	0,73	25		15,66	9,17	7,13	7,13	3,88	6,30	4,84	4,69	4,14	3,32
V2018-11-09_12:48	0	0	kein	-	0	-5	36	0,28	0,58	13		13,99	10,42	11,57	11,21	8,11	10,17	8,57	10,37	8,05	7,91
V2018-11-09_12:51	0	0	kein	-	0	-5	12	0,28	0,73	25		15,48	9,24	6,98	6,72	4,02	5,86	4,68	4,99	4,08	3,01
V2018-11-13_10:43	0	0	Würfel	-0,5 (-0,625)	0	0	36	0,28	0,58	13		13,13	11,27	10,30	10,76	7,28	9,26	7,35	9,03	6,80	6,42
V2018-11-13_11:31'	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14	0,58	53		4,56	2,21	1,12	1,45	0,89	0,95	0,65	0,70	0,42	0,19
V2018-11-13_11:41**	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	1,13	0,14	0,58	53		0,65	0,44	0,28	0,36	0,34	0,30	0,23	0,19	0,15	0,11
V2018-11-13_12:04**	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	1,13	0,14	0,58	53		0,60	0,28	0,19	0,19	0,26	0,15	0,14	0,08	0,06	0,08
V2018-11-14_10:29	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	48	0,28	0,55	11		10,06	14,59	15,11	14,33	12,11	13,80	11,82	12,76	11,64	11,49
V2018-11-14_10:33	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	36	0,28	0,58	13		7,68	12,67	12,06	11,52	9,34	10,09	8,35	9,32	7,96	8,15
V2018-11-14_10:37	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	24	0,28	0,63	17		7,64	10,19	7,67	9,00	5,45	7,27	5,62	5,72	4,94	3,85
V2018-11-14_10:41	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	18	0,28	0,67	20		5,12	6,07	5,15	5,70	3,63	4,66	3,66	3,90	3,21	2,70
V2018-11-14_11:10	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	6	0,28	0,83	39		1,12	0,84	0,93	0,72	0,71	0,56	0,45	0,70	0,33	0,42
V2018-11-14_11:13	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	12	0,28	0,73	25		4,40	3,70	4,63	3,97	1,25	3,42	2,61	2,89	2,07	1,13
V2018-11-14_11:17	0	0	Würfel	0,2 (0,25)	0	0	48	0,28	0,55	11		5,80	5,33	9,56	8,89	8,99	8,24	7,42	8,89	7,76	7,86
V2018-11-14_11:22	0	0	Würfel	0,2 (0,25)	0	0	36	0,28	0,58	13		4,02	5,98	8,81	8,44	7,33	7,41	6,58	7,95	6,60	6,54
V2018-11-14_11:26	0	0	Würfel	0,2 (0,25)	0	0	24	0,28	0,63	17		2,62	4,26	7,06	6,99	4,81	5,88	4,71	5,30	4,19	4,00
V2018-11-14_11:30	0	0	Würfel	0,2	0	0	18	0,28	0,67	20		2,20	3,45	6,18	5,52	3,85	5,04	3,93	4,22	3,36	3,02

Versuch Nr.	$y_Q$ [m]	$z_Q$ [m]	Hinder- nis	$x_{IH}$ [m]	$\beta_T$ [%]	$\alpha_T$ [%]	$V_Q$ [l/min]	$\bar{u}_{s,ziel}$ [m/s]	$Fr_D$	$Fr_{DT}$	Bemerkungen	Zeitlicher Mittelwert der Konzentration $\bar{c}$ [Vol-%]									
												QIR 110	QIR 210	QIR 32L	QIR 310	QIR 32R	QIR 410	QIR 510	QIR 62L	QIR 610	QIR 62R
				(0,25)																	
V2018-11-14_11:34	0	0	Würfel	0,2 (0,25)	0	0	12	0,28	0,73	25		1,46	1,37	4,85	2,84	1,95	3,21	2,83	3,22	2,37	1,73
V2018-11-14_11:39	0	0	Würfel	0,2 (0,25)	0	0	6	0,28	0,83	39		0,42	0,50	2,98	0,88	0,88	1,07	1,06	1,85	0,89	0,76
V2018-11-15_10:30*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28	0,73	25		15,28	9,74	4,86	8,48	7,88	6,89	5,41	4,66	4,63	4,78
V2018-11-15_10:42	0	0	kein	-	0	0	14	0,28	0,70	23		15,39	11,21	6,12	8,98	8,33	7,38	5,75	5,12	5,06	5,27
V2018-11-15_10:46	0	0	kein	-	0	0	10	0,28	0,75	28		14,81	8,72	4,44	6,41	6,60	5,47	4,29	3,59	3,76	3,97
V2018-11-15_10:49	0	0	kein	-	0	0	38	0,28	0,58	13		13,76	12,47	11,63	12,30	12,03	10,98	9,39	10,31	9,23	10,62
V2018-11-15_10:53	0	0	kein	-	0	0	34	0,28	0,59	14		14,10	12,92	11,69	12,32	11,62	10,95	9,11	10,39	9,02	9,88
V2018-11-15_10:55**	0	0	kein	-	0	0	36	0,28	0,58	13		13,38	12,82	11,78	12,48	11,97	11,08	9,44	10,60	9,41	10,46
V2018-11-15_11:00*	0	0	kein	-	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25		15,38	9,65	5,10	7,54	7,54	6,39	5,01	4,21	4,45	4,62
V2018-11-15_11:05	0	0	kein	-	0	0	12	0,32 <sup>3</sup>	0,83	29		16,03	9,34	5,36	6,27	5,83	4,77	3,72	2,73	3,48	3,92
V2018-11-15_11:08	0	0	kein	-	0	0	36	0,32	0,67	15		13,86	11,88	10,75	12,02	9,93	10,61	8,70	10,01	8,17	8,72
V2018-11-15_11:15	0	0	kein	-	0	0	12	0,24 <sup>3</sup>	0,62	22		15,02	10,77	5,66	8,43	8,16	6,76	5,40	4,60	4,76	5,00
V2018-11-15_11:18	0	0	kein	-	0	0	36	0,24	0,50	11		13,68	13,54	12,79	12,70	12,39	11,53	10,14	11,13	10,00	11,06
V2018-11-16_14:21	0	0	Stau- Konfig. 1	s. An- hang A4	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab Quelle; s. Anhang A4	17,97	12,15	4,92	9,33	5,45	7,34	4,09	1,43	2,48	2,43
V2018-11-16_14:24	0	0	Stau- Konfig. 1	s. An- hang A4	0	0	36	0,28	0,58	13	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab Quelle; s. Anhang A4	20,37	16,57	9,84	15,96	10,87	14,07	10,28	5,89	7,86	8,16
V2018-11-16_14:48	0	0	Stau- Konfig. 1	s. An- hang A4	0	0	36	0,86 <sup>3</sup>	1,79	41	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab Quelle; s. Anhang A4	15,95	4,00	2,49	3,72	1,45	3,86	2,77	1,57	1,80	1,54
V2018-11-19_11:09	0	0	Stau- Konfig. 2	s. An- hang A4	0	0	12	0,28	0,73	25	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	17,01	7,04	3,26	4,71	2,74	3,57	2,71	1,86	1,86	1,33
V2018-11-19_11:12	0	0	Stau- Konfig. 2	s. An- hang A4	0	0	36	0,28	0,58	13	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	15,42	10,83	7,92	9,32	7,66	8,22	6,81	6,43	5,71	5,38
V2018-11-19_11:30	0	0	Stau- Konfig. 3	s. An- hang A4	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Anordnung aus 6 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	15,74	8,47	3,08	5,03	2,49	3,98	2,63	1,71	1,87	1,64
V2018-11-19_11:33	0	0	Stau- Konfig. 3	s. An- hang A4	0	0	36	0,28	0,58	13	Anordnung aus 6 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	16,89	12,00	7,94	10,05	8,67	9,10	6,48	7,82	5,66	7,07
V2018-11-19_11:39	0	0	Stau- Konfig. 4	s. An- hang A4	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Anordnung aus 4 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	15,27	6,79	2,02	3,78	2,55	2,18	1,39	1,46	1,07	1,29
V2018-11-19_11:42	0	0	Stau- Konfig. 4	s. An- hang A4	0	0	36	0,28	0,58	13	Anordnung aus 4 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	15,59	11,43	7,79	9,93	7,91	8,06	6,80	7,58	6,81	7,66
V2018-11-19_11:48	0	0	Stau- Konfig. 5	s. An- hang A4	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Anordnung aus 2 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	15,95	7,87	2,59	2,95	1,93	2,04	1,53	1,92	1,36	1,61
V2018-11-19_11:51	0	0	Stau- Konfig. 5	s. An- hang A4	0	0	36	0,28	0,58	13	Anordnung aus 2 Quadern beginnend ab QIR110; s. Anhang A4	15,61	11,47	9,63	8,67	9,11	7,87	7,09	7,60	6,94	7,41
V2018-11-19_12:14	0	0	Stau- Konfig. 6	s. An- hang A4	0	0	12	0,28 <sup>3</sup>	0,73	25	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab 416 mm vor Quelle; s. Anhang A4	25,76	16,49	2,19	7,05	2,14	3,84	2,42	2,10	1,96	1,64
V2018-11-19_12:17	0	0	Stau- Konfig. 6	s. An- hang A4	0	0	36	0,28	0,58	13	Anordnung aus 8 Quadern beginnend ab 416 mm vor Quelle; s. Anhang A4	22,54	18,45	13,79	15,43	11,68	12,01	9,81	9,64	9,25	9,16
V2018-11-23_11:46 <sup>1</sup>	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14	0,58	53		4,36	2,18	0,97	1,25	0,58	0,60	0,24	0,16	0,09	0,08
V2018-11-23_11:54 <sup>1</sup>	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14	0,58	53		4,14	1,96	0,78	1,14	0,93	0,57	0,27	0,13	0,07	0,15
V2018-11-23_12:05 <sup>1*</sup>	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	1,13	0,14 <sup>3</sup>	0,58	53		0,31	0,17	0,07	0,13	0,19	0,10	0,09	0,02	0,02	0,08
V2018-11-23_13:13 <sup>1*</sup>	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14 <sup>3</sup>	0,58	53		3,69	1,65	0,59	0,90	0,86	0,47	0,27	0,11	0,12	0,15
V2018-11-23_13:31 <sup>1*</sup>	0	0	Würfel	-0,2 (-0,25)	0	0	1,13	0,14	0,58	53		0,66	0,33	0,24	0,22	0,15	0,13	0,11	0,05	0,04	0,04
V2018-11-23_13:48 <sup>1*</sup>	0	0	kein	-	0	0	1,13	0,14	0,58	53		4,14	1,99	0,69	1,20	1,27	0,74	0,47	0,16	0,25	0,23

Tabelle A-6: Übersicht der Versuche im Modelltunnel - Parameterwerte und Versuchsergebnisse; Werte in () als Vielfache von  $b_T$ ; <sup>1</sup> Messergebnisse in erhöhter Position; <sup>2</sup> Wert fehlerhaft, da Hindernis Absaugung verdeckt; <sup>3</sup> Entsprechende Strömungsbedingungen in Tabelle A-4 aufgeführt; <sup>4</sup> negatives Vorzeichen = stromauf/luvseitig der Quelle; \* Versuche zur Mittelwertbildung von Sk 1; \*\* Versuche zur Mittelwertbildung von Sk 2; + Versuche zur Mittelwertbildung von hindernisfreier Verifizierungskonfiguration; ++ Versuche zur Mittelwertbildung von Verifizierungskonfiguration mit Hindernis

## A13 Ergebnisse der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs

	c0_wert	c0_Standardfehler	A1_wert	A1_Standardfehler	t1_wert	t1_Standardfehler	k_wert	k_Standardfehler	tau_wert	tau_Standardfehler	Anzahl der Punkte	Freiheitsgrade	Chi-Quadrat Reduziert	Summe der Fehlerquadrate	R-Quadrat (COD)	Kor. R-Quadrat	Fit-Status
V2018-10-18_13:42	0	0	8,30587	0,97001	0,88293	0,10678	1,13259	0,13697	0,612	0,07401	6	4	0,09499	0,37994	0,97012	0,96265	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:46	0	0	15,52621	1,80905	1,27017	0,17659	0,7873	0,10946	0,88041	0,1224	6	4	0,69756	2,79025	0,94813	0,93516	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:52	0	0	22,54055	1,71374	1,51017	0,14779	0,66218	0,0648	1,04677	0,10244	6	4	0,81867	3,27468	0,97186	0,96483	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:55	0	0	19,72128	0,48466	3,3233	0,16992	0,30091	0,01539	2,30354	0,11778	6	4	0,14101	0,56406	0,99049	0,98812	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:02	0	0	21,52467	1,09571	2,17108	0,17255	0,4606	0,03661	1,50488	0,1196	6	4	5,14E-01	2,06E+00	0,97868	0,97335	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:06	0	0	15,87856	0,68295	8,387	1,62988	0,11923	0,02317	5,81343	1,12975	6	4	0,4136	1,6544	0,86979	0,83724	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:09	0	0	18,73742	0,80514	4,37523	0,48426	0,22856	0,0253	3,03268	0,33566	6	4	0,45408	1,8163	0,9551	0,94388	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:13	0	0	17,56516	0,64389	5,57505	0,64404	0,17937	0,02072	3,86433	0,44641	6	4	0,32275	1,29102	0,95086	0,93857	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:16	0	0	16,85079	0,98157	6,5558	1,38478	0,15254	0,03222	4,54413	0,95986	6	4	0,79479	3,17917	0,84926	0,81158	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:32	0	0	9,04522	0,72489	0,91644	0,07715	1,09118	0,09187	0,63523	0,05348	6	4	0,05803	0,23212	0,98531	0,98164	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:35	0	0	10,00565	1,39506	1,52487	0,27491	0,65579	0,11823	1,05696	0,19055	6	4	0,54996	2,19983	0,90505	8,81E-01	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:39*	0	0	14,07413	0,3418	2,18791	0,08335	0,45706	0,01741	1,51654	0,05777	6	4	0,05037	0,20148	0,99527	0,99408	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:42	0	0	17,18307	0,55817	2,45503	0,13442	0,40733	0,0223	1,7017	0,09317	6	4	0,14925	0,59699	0,98999	0,98748	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:45	0	0	17,04856	0,71125	2,87444	0,22474	0,34789	0,0272	1,99241	0,15578	6	4	0,27486	1,09946	0,97915	0,97393	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:48**	0	0	16,07939	0,26963	4,66242	0,2121	0,21448	0,00976	3,23174	0,14701	6	4	0,05248	0,20993	0,99219	0,99024	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:13	0	0	16,917	2,41085	1,98796	0,42014	0,50303	0,10631	1,37795	0,29122	6	4	2,27331	9,09322	0,86092	0,82615	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:16	0	0	14,88423	3,22122	1,4781	0,4077	0,67654	0,18661	1,02454	0,2826	6	4	2,80494	11,21977	0,78982	0,73728	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:19	0	0	14,94085	1,67504	0,94939	0,11334	1,05331	0,12574	0,65807	0,07856	6	4	0,3364	1,34559	0,96912	0,9614	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:23	0	0	15,54456	1,56811	0,73678	0,07154	1,35727	0,13179	0,51069	0,04959	6	4	0,15261	0,61043	0,98384	0,9798	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:26	0	0	9,59184	0,90071	0,7435	0,06746	1,34499	0,12204	0,51536	0,04676	6	4	0,0517	0,20681	0,98577	0,98221	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_13:22	0	0	15,86377	0,51166	4,23784	0,34315	0,23597	0,01911	2,93745	0,23785	6	4	0,1805	0,72198	0,97546	0,96932	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:03	0	0	8,07034	1,08083	0,39409	0,03584	2,53748	0,23078	0,27316	0,02484	6	4	0,00594	0,02376	0,99291	0,99113	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:07	0	0	9,76258	1,47162	0,49756	0,05928	2,00979	0,23944	0,34488	0,04109	6	4	0,03338	0,13353	0,98355	0,97944	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:10	0	0	19,57407	2,7555	0,48142	0,05251	2,07719	0,22658	0,33369	0,0364	6	4	0,10152	0,40609	0,98674	0,98343	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:13	0	0	23,93225	1,90681	0,53942	0,03557	1,85384	0,12225	0,3739	0,02466	6	4	0,07797	0,31187	0,99467	0,99334	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:16	0	0	15,51638	0,77282	0,91207	0,04763	1,09641	0,05726	0,6322	0,03302	6	4	0,06521	0,26086	0,9945	0,99312	Erfolgreich(100)

	c0_wert	c0_Standardfehler	A1_wert	A1_Standardfehler	t1_wert	t1_Standardfehler	k_wert	k_Standardfehler	tau_wert	tau_Standardfehler	Anzahl der Punkte	Freiheitsgrade	Chi-Quadr Reduziert	Summe der Fehlerquadrate	R-Quadrat (COD)	Kor. R-Quadrat	Fit-Status
V2018-10-24_14:42	0	0	0,60486	0,20437	0,49522	0,13187	2,01929	0,53772	0,34326	0,09141	6	4	6,31E-04	2,52E-03	0,90853	0,88567	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:51	0	0	4,26128	0,55288	0,52085	0,05484	1,91995	0,20217	0,36102	0,03802	6	4	0,0057	0,02279	0,98649	0,98311	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:54	0	0	7,05026	0,99472	0,4847	0,05321	2,06312	0,22648	0,33597	0,03688	6	4	0,01363	0,05451	0,98641	0,98301	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:57	0	0	9,81477	1,62722	0,36762	0,03935	2,72022	0,29117	0,25481	0,02727	6	4	0,00919	0,03675	0,99102	0,98878	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_15:00	0	0	11,53863	2,43161	0,37648	0,05213	2,65619	0,3678	0,26096	0,03613	6	4	0,02345	0,09382	0,9841	0,98012	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_15:04	0	0	15,793	2,60638	0,35814	0,03742	2,7922	0,29173	0,24824	0,02594	6	4	0,02028	0,08111	0,99178	0,98972	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_15:07	0	0	15,79134	1,23661	1,17867	0,10684	0,84841	0,07691	0,81699	0,07406	6	4	0,28572	1,14289	0,97932	9,74E-01	Erfolgreich(100)
V2018-10-26_13:55*	0	0	13,97588	1,63576	2,02261	0,35455	0,49441	0,08667	1,40196	0,24575	6	4	1,06584	4,26335	0,90436	0,88045	Erfolgreich(100)
V2018-10-26_14:04*	0	0	15,04363	0,94753	2,25156	0,22636	0,44414	0,04465	1,56066	0,1569	6	4	0,39784	1,59136	0,967	0,95874	Erfolgreich(100)
V2018-10-29_10:43	0	0	19,06069	2,22839	2,34256	0,44804	0,42688	0,08165	1,62374	0,31056	6	4	2,28231	9,12924	0,87821	0,84776	Erfolgreich(100)
V2018-10-29_11:55	0	0	21,06834	0,82422	1,6244	0,0847	0,61561	0,0321	1,12595	0,05871	6	4	0,20916	0,83663	0,99186	0,98982	Erfolgreich(100)
V2018-10-29_14:05*	0	0	24,31402	2,43367	1,39011	0,17253	0,71937	0,08928	0,96355	0,11959	6	4	1,46075	5,84301	0,95635	0,94544	Erfolgreich(100)
V2018-10-31_13:00*	0	0	18,17725	0,35061	2,09494	0,06177	0,47734	0,01407	1,4521	0,04281	6	4	0,05077	0,20309	0,99713	0,99642	Erfolgreich(100)
V2018-11-01_10:33*	0	0	19,03833	0,39072	1,82115	0,05282	0,5491	0,01593	1,26232	0,03661	6	4	0,05415	0,21659	0,99737	0,99672	Erfolgreich(100)
V2018-11-01_13:29	0	0	8,12216	0,30412	0,8928	0,03477	1,12007	0,04362	0,61884	0,0241	6	4	0,00959	0,03837	0,99708	0,99635	Erfolgreich(100)
V2018-11-05_11:47	0	0	8,58595	0,78229	0,7326	0,06409	1,365	0,11942	0,5078	0,04443	6	4	0,03735	0,14941	0,98702	0,98377	Erfolgreich(100)
V2018-11-05_13:33**	0	0	15,86675	0,70073	4,47461	0,51838	0,22348	0,02589	3,10156	0,35932	6	4	0,34771	1,39084	0,95058	0,93822	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_10:57*	0	0	14,54019	1,87833	2,09612	0,41404	0,47707	0,09423	1,45292	0,28699	6	4	1,45801	5,83202	0,87908	0,84885	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_11:00**	0	0	15,3276	0,84954	3,90485	0,50922	0,25609	0,0334	2,70664	0,35297	6	4	0,47667	1,90666	0,9392	0,924	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_11:59	0	0	23,67703	1,98029	0,78827	0,06527	1,26859	0,10504	0,54639	0,04524	6	4	0,29481	1,17923	0,9876	0,9845	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:37	0	0	22,3614	2,6427	0,61047	0,06371	1,63809	0,17094	0,42314	0,04416	6	4	0,23708	0,94832	0,98428	0,98035	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:42	0	0	23,34433	1,5258	1,04078	0,07502	0,96082	0,06926	0,72141	0,052	6	4	0,34111	1,36442	0,98818	0,98523	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:46*	0	0	15,32786	1,63876	2,23265	0,37905	0,4479	0,07604	1,54755	0,26274	6	4	1,18057	4,72226	0,90792	0,8849	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:49**	0	0	16,95475	0,58915	4,79182	0,46203	0,20869	0,02012	3,32143	0,32025	6	4	0,25371	1,01484	0,96528	0,9566	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_13:35*	0	0	18,58415	1,3103	2,05241	0,21856	0,48723	0,05189	1,42262	0,1515	6	4	0,6944	2,77758	0,96309	0,95386	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_13:37**	0	0	14,23621	0,56525	7,02298	1,07448	0,14239	0,02178	4,86796	0,74477	6	4	0,26942	1,0777	0,91713	0,89641	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:30	0	0	18,53192	1,41801	2,05508	0,23769	0,4866	0,05628	1,42448	0,16475	6	4	0,81434	3,25736	0,95639	0,94548	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:42	0	0	18,92908	0,7146	2,19314	0,13005	0,45597	0,02704	1,52017	0,09015	6	4	0,22068	0,88271	0,98813	0,98517	Erfolgreich(100)

	c0_wert	c0_Standardfehler	A1_wert	A1_Standardfehler	t1_wert	t1_Standardfehler	k_wert	k_Standardfehler	tau_wert	tau_Standardfehler	Anzahl der Punkte	Freiheitsgrade	Chi-Quadr Reduziert	Summe der Fehlerquadrate	R-Quadrat (COD)	Kor. R-Quadrat	Fit-Status
V2018-11-15_10:46	0	0	19,16542	1,95944	1,60661	0,21775	0,62243	0,08436	1,11361	0,15093	6	4	1,16502	4,6601	0,94463	0,93079	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:49	0	0	15,04461	0,47897	6,25844	0,69377	0,15978	0,01771	4,33802	0,48088	6	4	0,1863	0,7452	0,95464	0,9433	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:53	0	0	15,71593	0,50899	5,46329	0,54806	0,18304	0,01836	3,78687	0,37989	6	4	0,20009	0,80037	0,96287	0,95359	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:55	0	0	14,87345	0,57511	6,71546	0,96174	0,14891	0,02133	4,6548	0,66663	6	4	0,27499	1,09998	0,92684	0,90855	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:00	0	0	19,1109	1,63559	1,85639	0,22685	0,53868	0,06583	1,28675	0,15724	6	4	0,97009	3,88035	0,95237	0,94047	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:05	0	0	22,58294	2,09902	1,33653	0,15144	0,74821	0,08478	0,92641	0,10497	6	4	1,02144	4,08577	0,96452	0,95564	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:08	0	0	15,33892	0,67538	5,07552	0,65051	0,19702	0,02525	3,51808	0,4509	6	4	0,34186	1,36743	0,94135	0,92669	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:15	0	0	18,68909	0,80282	2,07447	0,13543	0,48205	0,03147	1,43792	0,09387	6	4	0,26356	1,05422	0,98581	0,98226	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:18	0	-	0	-	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	0	0,98226	Fehlgeschlagen(-207)
V2018-11-23_11:54	0	0	8,16682	0,31444	0,75917	0,02849	1,31722	0,04944	0,52622	0,01975	6	4	0,00669	0,02676	0,9977	0,99712	Erfolgreich(100)
V2018-11-23_13:13	0	0	7,56829	0,33834	0,71615	0,03044	1,39635	0,05935	0,4964	0,0211	6	4	0,00653	0,02612	0,99712	0,99641	Erfolgreich(100)
V2018-11-23_13:48	0	0	7,51265	0,46288	0,84654	0,05313	1,18128	0,07414	0,58678	0,03683	6	4	0,01946	0,07784	0,99257	0,99072	Erfolgreich(100)
Mittelung aus Versuchen in Sk 1	0	0	16,86989	1,05186	1,9766	0,18218	0,50592	0,04663	1,37008	0,12628	6	4	0,4301	1,72041	0,97249	0,96562	Erfolgreich(100)
Mittelung aus Versuchen in Sk 2	0	0	15,83874	0,59274	4,58294	0,45877	0,2182	0,02184	3,17665	0,318	6	4	0,25163	1,00651	0,96291	0,95364	Erfolgreich(100)

Tabelle A-7: Parameterwerte der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs auf Basis von Exponentialfunktion  $c_1(x) = c_0 + a_0 \cdot e^{-x/k_0}$  mit  $c_0 = 0$  Vol-%,  $a_0 > 0$  Vol-%,  $k_0 > 0$  und  $c_0 + a_0 \leq 100$  Vol-%

	c0_wert	c0_Standardfehler	A1_wert	A1_Standardfehler	t1_wert	t1_Standardfehler	k_wert	k_Standardfehler	tau_wert	tau_Standardfehler	Anzahl der Punkte	Freiheitsgrade	Chi-Quadr Reduziert	Summe der Fehlerquadrate	R-Quadrat (COD)	Kor. R-Quadrat	Fit-Status
V2018-10-18_13:42	0,6	0,09312	10,41598	0,85575	38,91155	3,51718	0,0257	0,00232	26,97143	2,43792	6	3	0,01388	0,04165	0,99672	0,99454	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:46	2,2	0,17666	19,79177	1,23277	29,1721	2,24367	0,03428	0,00264	20,22056	1,5552	6	3	0,04143	0,12428	0,99769	0,99615	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:52	3,4	0,23711	24,59305	0,74708	29,57998	1,62802	0,03381	0,00186	20,50328	1,12846	6	3	0,03805	0,11414	0,99902	0,99837	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:55	1,1	4,83838	18,77943	4,08998	80,17295	36,68524	0,01247	0,00571	55,57165	25,42827	6	3	0,18543	0,55629	0,99062	0,98437	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:02	4,6	0,63535	20,29438	0,77974	34,70812	4,18932	0,02881	0,00348	24,05783	2,90382	6	3	0,10483	0,3145	0,99674	0,99456	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:06	7,9	9,17655	8,38156	7,90782	64,28132	121,3214 2	0,01556	0,02936	44,55641	84,0936	6	3	0,53553	1,6066	0,87356	0,78926	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:09	5,7	5,3502	13,91264	4,06876	58,27096	45,68231	0,01716	0,01345	40,39035	31,66456	6	3	0,55065	1,65194	0,95916	0,93194	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:13	0,1	24,41416	17,46989	23,32208	125,2555 8	241,1589	0,00798	0,01537	86,82055	167,1586 1	6	3	0,43034	1,29101	0,95086	0,9181	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:16	10,2	2,16662	8,79825	1,97429	27,51653	23,27793	0,03634	0,03074	19,073	16,13503	6	3	0,8552	2,56561	0,87836	0,79726	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:32	0,5	0,07265	10,30077	0,43257	45,73539	2,5445	0,02186	0,00122	31,70136	1,76371	6	3	0,00621	0,01864	0,99882	0,99803	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:35	2,12218	0,15524	14,45268	1,56228	25,46008	2,91984	0,03928	0,0045	17,64758	2,02388	6	3	0,04081	0,12242	0,99472	0,99119	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:39*	0	3,2229	14,28025	2,38589	80,26289	38,09854	0,01246	0,00591	55,63399	26,4079	6	3	0,23845	0,71536	0,9832	0,97199	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:42	0	3,54883	17,24505	2,75088	74,02061	30,35555	0,01351	0,00554	51,30717	21,04087	6	3	0,21194	0,63582	0,98933	0,98222	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:45	0	6,23136	17,0569	5,17764	76,62679	50,97758	0,01305	0,00868	53,11364	35,33496	6	3	0,36668	1,10005	0,97914	0,96523	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:48**	0	7,01733	16,07932	6,57116	105,5774 3	67,248	0,00947	0,00603	73,1807	46,61276	6	3	0,06998	0,20993	0,99219	0,98698	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:13	5,1103	0,41118	25,64126	4,94769	11,64482	2,22471	0,08588	0,01641	8,07158	1,54205	6	3	0,31683	0,95049	0,98546	0,97577	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:16	3,55639	0,04723	36,75255	1,79153	9,31695	0,30692	0,10733	0,00354	6,45802	0,21274	6	3	0,00635	0,01905	0,99964	0,99941	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:19	1,19899	0,1821	18,52654	1,46477	20,96781	1,92666	0,04769	0,00438	14,53378	1,33546	6	3	0,04865	0,14596	0,99665	0,99442	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:23	0,64913	0,13817	18,38261	1,36786	25,61492	2,03536	0,03904	0,0031	17,75491	1,41081	6	3	0,03201	0,09603	0,99746	0,99576	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:26	0,3949	0,06227	11,22273	0,58503	38,59307	2,19368	0,02591	0,00147	26,75067	1,52054	6	3	0,00629	0,01888	0,9987	0,99783	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_13:22	5,00264	2,6299	11,69794	1,90649	44,54139	21,57098	0,02245	0,01087	30,87374	14,95186	6	3	0,18094	0,54281	0,98155	0,96925	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:03	0,08594	0,0213	9,65064	0,90061	23,21007	1,41841	0,04308	0,00263	16,08799	0,98317	6	3	0,00132	0,00397	0,99882	0,99803	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:07	0,2	0,06672	12,26818	1,76329	18,163	1,9695	0,05506	0,00597	12,58963	1,36515	6	3	0,01152	0,03456	0,99574	0,99291	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:10	0,4	0,10218	24,14553	2,78176	13,63345	1,17394	0,07335	0,00632	9,44999	0,81371	6	3	0,02726	0,08178	0,99733	0,99555	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:13	0,3	0,12305	26,44355	1,85187	14,17698	0,90529	0,07054	0,0045	9,82673	0,6275	6	3	0,03171	0,09514	0,99838	0,99729	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:16	0,6	0,11332	16,58096	0,48548	20,06877	0,90951	0,04983	0,00226	13,91061	0,63042	6	3	0,0115	0,03449	0,99927	0,99879	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:42	0,0	0,00323	1,32909	0,34248	18,14776	2,40431	0,0551	0,0073	12,57907	1,66654	6	3	3,50E-05	1,05E-04	0,9962	0,99366	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:51	0,1	0,02155	5,20565	0,47665	19,26027	1,40904	0,05192	0,0038	13,3502	0,97667	6	3	0,00113	0,0034	0,99798	0,99664	Erfolgreich(100)

	c0_wert	c0_Standardfehler	A1_wert	A1_Standardfehler	t1_wert	t1_Standardfehler	k_wert	k_Standardfehler	tau_wert	tau_Standardfehler	Anzahl der Punkte	Freiheitsgrade	Chi-Quadr Reduziert	Summe der Fehlerquadrate	R-Quadrat (COD)	Kor. R-Quadrat	Fit-Status
V2018-10-24_14:54	0,1	0,03065	8,76889	0,84135	13,59784	0,97264	0,07354	0,00526	9,4253	0,67418	6	3	0,00246	0,00738	0,99816	0,99693	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:57	0,1	0,02367	12,3376	1,38686	9,22258	0,61996	0,10843	0,00729	6,39261	0,42972	6	3	0,00173	0,0052	0,99873	0,99788	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_15:00	0,2	0,03059	16,00733	2,12675	7,8493	0,596	0,1274	0,00967	5,44072	0,41312	6	3	0,00297	0,00892	0,99849	0,99748	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_15:04	0,2	0,02902	19,86082	1,8412	6,83927	0,37117	0,14621	0,00794	4,74062	0,25727	6	3	0,00264	0,00792	0,9992	0,99866	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_15:07	1,5	0,21627	17,73061	0,88585	22,88777	1,80983	0,04369	0,00345	15,86459	1,25448	6	3	0,04026	0,12077	0,99781	0,99636	Erfolgreich(100)
V2018-10-26_13:55*	3,7	0,9218	15,64968	3,924	26,54291	10,33404	0,03767	0,01467	18,39814	7,16301	6	3	0,75661	2,26984	0,94908	0,91513	Erfolgreich(100)
V2018-10-26_14:04*	1,5	2,95675	14,17121	1,90098	62,69583	33,19011	0,01595	0,00844	43,45744	23,00563	6	3	0,50685	1,52056	0,96846	0,94744	Erfolgreich(100)
V2018-10-29_10:43	6,4	0,3042	23,05043	2,02762	12,91671	1,43137	0,07742	0,00858	8,95318	0,99215	6	3	0,11874	0,35623	0,99525	0,99208	Erfolgreich(100)
V2018-10-29_11:55	2,2	0,40099	20,97504	0,49284	40,79942	3,00888	0,02451	0,00181	28,28	2,0856	6	3	0,04183	0,12548	0,99878	0,99796	Erfolgreich(100)
V2018-10-29_14:05*	3,7	0,12721	28,83263	0,64034	24,9595	0,79373	0,04006	0,00127	17,30061	0,55017	6	3	0,01663	0,0499	0,99963	0,99938	Erfolgreich(100)
V2018-10-31_13:00*	1,7	0,53245	17,28535	0,33942	58,47194	4,8516	0,0171	0,00142	40,52966	3,36287	6	3	0,02121	0,06364	0,9991	0,9985	Erfolgreich(100)
V2018-11-01_10:33*	1,42272	0,41118	18,49756	0,28285	52,27134	3,46843	0,01913	0,00127	36,23173	2,40413	6	3	0,01892	0,05675	0,99931	0,99885	Erfolgreich(100)
V2018-11-01_13:29	0,10784	0,12334	8,28653	0,39604	75,60038	6,48095	0,01323	0,00113	52,40219	4,49225	6	3	0,01048	0,03144	0,99761	0,99602	Erfolgreich(100)
V2018-11-05_11:47	0,32548	0,06652	9,94056	0,61634	51,18761	3,48014	0,01954	0,00133	35,48054	2,41225	6	3	0,00712	0,02136	0,99814	0,99691	Erfolgreich(100)
V2018-11-05_13:33**	6,12581	2,78664	10,90784	1,84097	42,94404	26,48324	0,02329	0,01436	29,76654	18,35678	6	3	0,35916	1,07747	0,96171	0,93619	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_10:57*	4,30478	0,85898	17,80252	5,4916	22,84146	9,04151	0,04378	0,01733	15,83249	6,2671	6	3	0,91756	2,75268	0,94293	0,90488	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_11:00**	4,85689	3,69617	11,4949	2,48482	44,28634	33,55178	0,02258	0,01711	30,69695	23,25632	6	3	0,56337	1,6901	0,94611	0,91018	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_11:59	0,9809	0,20556	27,00791	1,57428	13,76074	0,95166	0,07267	0,00503	9,53822	0,65964	6	3	0,05993	0,1798	0,99811	0,99685	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:37	0,71407	0,1109	27,27398	1,74241	9,43122	0,54102	0,10603	0,00608	6,53722	0,375	6	3	0,02626	0,07879	0,99869	0,99782	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:42	1,46257	0,28045	25,54429	1,12711	15,56751	1,09754	0,06424	0,00453	10,79058	0,76075	6	3	0,06656	0,19968	0,99827	0,99712	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:46*	4,25176	1,26574	15,60589	3,58515	30,71306	13,53789	0,03256	0,01435	21,28867	9,38375	6	3	0,97957	2,9387	0,9427	0,9045	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:49**	5,44615	4,47869	12,18437	3,53157	57,98642	41,59476	0,01725	0,01237	40,19313	28,83129	6	3	0,29721	0,89162	0,9695	0,94916	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_13:35*	3,79995	1,22424	18,0057	1,81881	38,27238	10,79526	0,02613	0,00737	26,5284	7,4827	6	3	0,47838	1,43514	0,98093	0,96821	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_13:37**	0	35,85414	14,23601	34,87257	159,04148	516,32411	0,00629	0,02041	110,23915	357,8886	6	3	0,35923	1,0777	0,91713	0,86188	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:30	4,15034	1,05104	18,36006	2,04384	34,96112	9,24395	0,0286	0,00756	24,2332	6,40742	6	3	0,46571	1,39713	0,98129	0,96882	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:42	3,32444	0,64496	17,55679	0,52105	44,89465	5,38091	0,02227	0,00267	31,1186	3,72976	6	3	0,06385	0,19156	0,99742	0,99571	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:46	3,75844	0,38257	22,72845	1,89613	27,0018	3,24934	0,03703	0,00446	18,71622	2,25227	6	3	0,1485	0,4455	0,99471	0,99118	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:49	0	23,7045	15,0445	22,88205	138,68911	290,33069	0,00721	0,01509	96,13197	201,2419	6	3	0,2484	0,7452	0,95464	0,92441	Erfolgreich(100)

	c0_wert	c0_Standardfehler	A1_wert	A1_Standardfehler	t1_wert	t1_Standardfehler	k_wert	k_Standardfehler	tau_wert	tau_Standardfehler	Anzahl der Punkte	Freiheitsgrade	Chi-Quadr Reduziert	Summe der Fehlerquadrate	R-Quadrat (COD)	Kor. R-Quadrat	Fit-Status
V2018-11-15_10:53	0	18,75749	15,71577	17,89683	126,57828	208,94554	0,0079	0,01304	87,73738	144,83001	6	3	0,26679	0,80037	0,96287	0,93812	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_10:55	0	33,24409	14,88921	32,24894	152,27344	443,11274	0,00657	0,01911	105,54791	307,14235	6	3	0,36718	1,10155	0,92673	0,87789	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:00	4,23056	0,52083	20,67117	1,72132	29,08143	4,27807	0,03439	0,00506	20,15771	2,96533	6	3	0,19198	0,57595	0,99293	0,98822	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:05	3,10815	0,13276	26,27659	0,61656	25,7107	0,89775	0,03889	0,00136	17,8213	0,62227	6	3	0,01693	0,05078	0,99956	0,99927	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:08	0	21,18941	15,33876	20,05818	114,93877	224,93049	0,0087	0,01703	79,66948	155,90993	6	3	0,45581	1,36743	0,94135	0,90226	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:15	3,39602	0,33643	17,70563	0,35569	42,98765	2,9751	0,02326	0,00161	29,79677	2,06218	6	3	0,0248	0,0744	0,999	0,99833	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:18	13,75016	-	-0,03429	-	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	0	0,99833	Fehlgeschlagen(-207)
V2018-11-23_11:54	0	0,10103	8,16029	0,42184	68,77819	5,57377	0,01454	0,00118	47,67341	3,86344	6	3	0,00894	0,02681	0,99769	0,99615	Erfolgreich(100)
V2018-11-23_13:13	0	-	7,78276	-	78,94839	-	0,01267	-	54,72285	-	0	0	0	-	-	0,99615	Erfolgreich(102)
V2018-11-23_13:48	0,2449	0,0985	8,09183	0,50508	63,78455	5,6514	0,01568	0,00139	44,21208	3,91725	6	3	0,01013	0,03038	0,9971	0,99517	Erfolgreich(100)
Mittelung aus Versuchen in Sk 1	3,14167	0,89954	16,41056	1,26116	39,02396	8,67752	0,02563	0,0057	27,04935	6,0148	6	3	0,24285	0,72856	0,98835	0,98058	Erfolgreich(100)
Mittelung aus Versuchen in Sk 2	4,05654	5,70101	12,24587	4,72326	64,68586	55,06321	0,01546	0,01316	44,83682	38,16691	6	3	0,31564	0,94691	0,96511	0,94185	Erfolgreich(100)

Tabelle A-8: Parameterwerte der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs auf Basis von Exponentialfunktion  $c_2(x) = c_0 + a_0 \cdot e^{-x/k_0}$  mit  $c_0 \geq 0$  Vol-%,  $a_0 > 0$  Vol-%,  $k_0 > 0$  und  $c_0 + a_0 \leq 100$  Vol-%

	A1_wer t	A1_Stan dard- fehler	A2_wer t	A2_Stan dard- fehler	t1_wert	t1_Stan dard- fehler	t2_wert	t2_Stan dard- fehler	k1_wer t	k1_Stan dard- fehler	k2_wer t	k2_Stan dard- fehler	tau1_w ert	tau1_St andard- fehler	tau2_w ert	tau2_St andard- fehler	R- Quad- rat (COD)	Kor. R- Quad- rat	Fit-Status
V2018-10-18_13:42	13,7879 2	0,41019	0,30528	0,00857	3,05187	0,08681	1,77337	0,03664	3,27573	0,09195	0,5639	0,01165	0,2116	0,00594	1,22921	0,0254	0,99999	0,99998	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:46	21,7959	1,60057	0,40418	0,04673	5,80182	0,78376	3,18398	0,50095	2,47413	0,28604	0,31407	0,04941	0,28016	0,03239	2,20697	0,34723	0,99978	0,99946	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:52	21,8663 4	1,53791	0,5912	0,12815	8,80594	2,96374	3,64231	1,39078	1,69148	0,36666	0,27455	0,10483	0,40979	0,08883	2,52465	0,96401	0,9996	0,99899	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_13:55	100	25341,4 308	0,10145	5,04144	19,1212 2	1,8086	3,48886	0,51545	9,85718	489,846 88	0,28663	0,04235	0,07032	3,49446	2,4183	0,35728	0,99249	0,98123	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:02	16,5835 3	10,2581 1	0,34177	0,22116	16,7973 6	2,32339	2,88518	0,44611	2,92593	1,89335	0,3466	0,05359	0,2369	0,1533	1,99985	0,30922	0,99853	0,99632	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:06	100	10603,9 437	0,11529	2,73334	15,0172 6	1,95464	10,4811 5	6,05116	8,67371	205,638 31	0,09541	0,05508	0,07991	1,89461	7,26498	4,19434	0,91004	0,7751	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:09	5,66058	6,55274	3,55E+8 2	9,63E+0 8	13,9126 8	4,98331	2,39243	2,29712	2,82E- 83	0	0,41799	0,40133	2,46E+8 2	0	1,6583	1,59224	0,95916	0,89791	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:13	0,09977	29,9010 9	6,81E+1 03	-	17,4698 9	28,5635 7	5,53161	13,0437 8	1,47E- 104	0	0,18078	0,42628	4,72E+1 03	0	3,83422	9,04126	0,95086	0,87714	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:16	100	2957,91 567	0,13547	1,06333	15,0909 6	2,16489	9,52271	5,49401	7,38186	57,9428 9	0,10501	0,06059	0,0939	0,73705	6,60064	3,80816	0,93893	0,84734	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:32	9,82218	0,53251	0,42942	0,07272	3,14062	0,92047	1,76877	0,32485	2,32872	0,39436	0,56536	0,10383	0,29765	0,05041	1,22602	0,22517	0,99982	0,99955	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:35	20,6058 1	1,71498	0,31083	0,02113	4,46592	0,20261	3,82642	0,26186	3,21717	0,21866	0,26134	0,01788	0,21545	0,01464	2,65228	0,18151	0,99991	1,00E+0 0	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:39*	11,4091 5	-	2,18791	181862, 532	2,66498	-	2,18791	778580, 594	0,45706	37991,3 773	0,45706	162646, 005	126057, 502	1,51654	1,51655	945	0,99527	0,98817	Fehlgeschlagen(-203)
V2018-10-18_14:42	3,91611	-	2,45509	86337,5 322	13,2669 6	-	2,45501	25484,5 334	0,40732	14324,0 162	0,40733	4228,32 809	59844,6 169	1,70174	1,70169	17664,5 325	0,98999	0,97497	Fehlgeschlagen(-203)
V2018-10-18_14:45	0	8,32318	161,129 67	2,28E+0 8	17,1285 8	6,99463	2,90155	2,48114	0,00621	8775,13 462	0,34464	0,29471	111,686 58	1,58E+0 8	2,0112	1,71979	0,97816	0,94541	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_14:48**	2,53408	-	4,66203	0	13,5453	-	4,6625	13090,6 652	0,2145	0	0,21448	67	3,23147	0	3,2318	765	0,99219	0,98047	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:13	5,1103	0,50359	5,43E+1 01	-	25,6412 7	6,05966	0,51427	0,12033	1,84E- 102	0	1,94452	0,45499	3,76E+1 01	0	0,35646	0,08341	0,98546	0,96366	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:16	3,55639	0,05785	1,97E+7 8	-	36,7525 5	2,19417	0,34986	0,01412	5,09E- 79	0	2,8583	0,11532	1,36E+7 8	0	0,2425	0,00978	0,99964	0,99911	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:19	24,5861 9	4,35018	0,30324	0,04942	6,09731	0,86491	1,80991	0,19057	3,29771	0,5374	0,55251	0,05818	0,21019	0,03425	1,25454	0,13209	0,99979	0,99947	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:23	24,8077	2,88281	0,2804	0,02867	5,91239	0,59753	1,30962	0,0745	3,56629	0,36466	0,76358	0,04344	0,19436	0,01987	0,90776	0,05164	0,99995	0,99988	Erfolgreich(100)
V2018-10-18_15:26	11,9166 4	0,29512	0,38087	0,02004	2,5247	0,28547	1,6051	0,1093	2,62555	0,13814	0,62302	0,04243	0,264	0,01389	1,11257	0,07576	0,99998	0,99995	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_13:22	100	8180,27 693	0,1124	2,0046	14,9576 6	1,42216	4,77175	0,94631	8,8969	158,673 61	0,20957	0,04156	0,07791	1,38948	3,30752	0,65593	0,98724	0,96809	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:03	14,1178 6	1,43515	0,24355	0,01667	0,78773	0,16568	1,13829	0,12446	4,10589	0,28098	0,87851	0,09606	0,16882	0,01155	0,789	0,08627	0,99997	0,99992	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:07	47,3737 4	12,4029 1	0,16332	0,01489	2,503	0,13433	1,04109	0,02961	6,12277	0,55805	0,96053	0,02732	0,11321	0,01032	0,72163	0,02052	0,99999	0,99997	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:10	43,7872	5,40451	0,22533	0,016	3,74	0,3966	1,13345	0,06377	4,43802	0,31507	0,88226	0,04964	0,15618	0,01109	0,78565	0,0442	0,99998	0,99994	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:13	56,7218 2	46,3738 8	0,1893	0,07125	10,7002 7	2,1573	0,79775	0,06578	5,28259	1,98839	1,25353	0,10337	0,13121	0,04939	0,55296	0,0456	0,99992	0,99979	Erfolgreich(100)
V2018-10-22_15:16	12,3150 4	0,68825	0,42033	0,07134	7,94693	1,54447	1,31359	0,11801	2,37908	0,4038	0,76127	0,06839	0,29135	0,04945	0,91051	0,0818	0,99995	0,99987	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:42	1,32908	0,41945	0,26485	0,04297	0,02951	0,00396	1,25E+7 7	2,32E- 156	3,77572	0,61265	7,97E- 78	0	0,18358	0,02979	8,69E+7 6	0	0,9962	0,9905	Erfolgreich(100)
V2018-10-24_14:51	6,78057	1,15731	0,29153	0,04659	0,65068	0,26613	1,40815	0,34203	3,43016	0,54822	0,71015	0,17249	0,20207	0,0323	0,97605	0,23708	0,99975	0,99937	Erfolgreich(100)

	A1_wer t	A1_Sta ndard- fehler	A2_wer t	A2_Sta ndard- fehler	t1_wert	t1 Stan dard- fehler	t2_wert	t2 Stan dard- fehler	k1_wer t	k1 Stan dard- fehler	k2_wer t	k2 Stan dard- fehler	tau1_w ert	tau1_St andard- fehler	tau2_w ert	tau2_St andard- fehler	R- Quad- rat (COD)	Kor. R- Quad- rat	Fit-Status	
V2018-10-24_14:54	12,7596 4	0,27518	0,26098	0,00415	1,03171	0,03681	1,32946	0,02777	3,83172	0,06088	0,75218	0,01571	0,1809	0,00287	0,92151	0,01925	1	0,99999	Erfolgreich(100)	
V2018-10-24_14:57	18,5121 1	1,80018	0,23091	0,01291	0,66046	0,11751	1,35084	0,14801	4,33072	0,24204	0,74028	0,08111	0,16005	0,00895	0,93633	0,1026	0,99997	0,99992	Erfolgreich(100)	
V2018-10-24_15:00	24,9828 8	3,52114	0,22163	0,01602	0,70915	0,1353	1,74292	0,25961	4,51201	0,3262	0,57375	0,08546	0,15362	0,01111	1,2081	0,17995	0,99993	0,99983	Erfolgreich(100)	
V2018-10-24_15:04	26,9806 3	1,03071	0,24219	0,00561	0,78312	0,07345	1,55445	0,10056	4,12893	0,09572	0,64331	0,04162	0,16788	0,00389	1,07746	0,0697	0,99999	0,99998	Erfolgreich(100)	
V2018-10-24_15:07	17,1542 9	1,68983	0,37451	0,06093	8,22511	1,02485	1,92086	0,17385	2,67015	0,43438	0,5206	0,04712	0,25959	0,04223	1,33144	0,1205	0,99986	1,00E+0 0	Erfolgreich(100)	
V2018-10-26_13:55*	3,69211	1,12897	5	1,47E+0 9	15,6496 9	4,80591	0,75536	0,36018	8,90E- 96	0	1,32387	0,63127	7,78E+9 4	0	0,52358	0,24966	0,94908	0,8727	Erfolgreich(100)	
V2018-10-26_14:04*	1,47709	3,62124	5	8,72E+9 5	14,1712	2,32819	1,7842	1,1568	1,15E- 96	0	0,56048	0,36339	6,05E+9 5	0	1,23671	0,80183	0,96846	0,92116	Erfolgreich(100)	
V2018-10-29_10:43	6,43435	0,37256	2	9,40E+8 2	23,0504 3	2,48332	0,64	0,08686	1,06E- 83	0	1,56249	0,21206	6,51E+8 2	0	0,44362	0,06021	0,99525	0,98812	Erfolgreich(100)	
V2018-10-29_11:55	11,5474	4,8945	0,58819	4,58E- 01	1,37E+0 1	7,67153	2,27494	0,87384	1,70013	1,32E+0 0	0,43957	0,16885	0,4077	3,18E- 01	1,57687	0,6057	0,99904	0,99761	Erfolgreich(100)	
V2018-10-29_14:05*	28,7855	0,94932	0,7025	8,83E- 02	3,8995	1,77893	77,4218	825,429 1	1,79E- 01	0,01292	0,13771	0,48694	6,12E- 02	53,6647 1	572,144 47	0,99963	0,99907	Erfolgreich(100)		
V2018-10-31_13:00*	17,2853 2	13,2953 8	1,66398	1,23098	1,68962	4	14,0940 4,67	258402 3	1,07E+1 3	0,60097	0,44459	3,87E- 07	1,60923	1,15338	0,85325	179110 9,42	7,45E+1 2	0,9991	0,99775	Erfolgreich(100)
V2018-11-01_10:33*	18,4975 6	0,34642	1,48754	0,12089	1,42272	0,50359	1,85E+1 35	0	0,67225	0,05463 136	5,40E- 136	0	1,03109	0,08379	1,28E+1 35	0	0,99931	0,99828	Erfolgreich(100)	
V2018-11-01_13:29	100	6955,55 25	0,09989	1,34974	6,81396	1,21114	0,99633	0,09447	10,0111	135,273 62	1,00369	0,09517	0,06924	0,93557	0,6906	0,06548	0,99935	0,99838	Erfolgreich(100)	
V2018-11-05_11:47	11,0894 5	0,87826	0,33532	0,03996	2,8672	0,51215	1,3631	0,13224	2,98223	0,35538	0,73362	0,07117	0,23243	0,0277	0,94483	0,09166	0,99992	0,99981	Erfolgreich(100)	
V2018-11-05_13:33**	100	5934,88 72	0,12066	1,68195	14,6439 6	1,89502	5,32627	1,59196	8,28767	115,525 39	0,18775	0,05612	0,08364	1,16584	3,69189	1,10346	0,97443	0,93609	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_10:57*	4,30478	1,05203	14	2,40E+1 9	17,8025 2	6,72581	0,65003	0,31513	4,17E- 115	0	1,5384	0,74582	1,66E+1 14	0	0,45056	0,21843	0,94293	0,85732	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_11:00**	13,7808 5	2,14119	4,80437	1,5749	74108,1 793	2,39E+0 9	0,04862	146,457 99	0,20814	0,06823	20,5667	61950,1 487	3,33014	1,09163	0,0337	101,516 95	0,97147	0,92868	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_11:59	30,6608 6	5,39284	0,30842	0,06374	10,2390 8	2,0574	1,28763	0,13796	3,24234	0,67004	0,77662	0,08321	0,21378	0,04418	0,89251	0,09563	0,99984	0,99961	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_12:37	32,0673 2	0,96122	0,33769	0,01318	3,87459	0,40254	1,65E+0 0	1,12E- 01	2,96133	0,11558	6,07E- 01	0,04111	0,23407	0,00914	0	1,14E+0 0	0,07739	0,99998	0,99996	Erfolgreich(100)
V2018-11-08_12:42	23,5019 2	4,69386	0,33466	0,09145	13,5931 3	2,23548	1,4907	0,1455	2,98812	0,81651	0,67083	0,06548	0,23197	0,06339	1,03327	0,10085	0,99979	0,99948	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_12:46*	11,2911 1	2,5005	3,33581	1,11125	63644,7 468	3,93E+0 8	0,05315	33,4599 8	0,29978	0,09986	18,8162 8	11846,5 867	2,31221	0,77026	0,03684	23,1926 9	0,98385	0,95962	Fehlgeschlagen(-200)	
V2018-11-08_12:49**	100	10159,1 751	0,11284	2,50887	16,0659 9	1,7638	5,41103	1,39519	8,86203	197,035 6	0,18481	0,04765	0,07822	1,73902	3,75064	0,96707	0,97807	0,94518	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_13:35*	100	795,473 25	0,14932	0,35458	14,7823	1,84534	2,67296	0,40266	6,6969	15,9023 4	0,37412	0,05636	0,1035	0,24578	1,85275	0,2791	0,99628	0,9907	Erfolgreich(100)	
V2018-11-08_13:37**	0	43,9109 1	5,10E+1 03	1,20E+0 9	14,2360 7	42,7087 4	7,02359	27,9257	1,96E- 104	0	0,14238	0,56609	3,54E+1 03	0	4,86838	19,3566 2	0,91713	0,79282	Erfolgreich(100)	
V2018-11-15_10:30	85,7021	14	0,16152	0,25127	14,2979	1,6006	2,78608	0,38833	6,19121	9,6316	0,35893	0,05003	0,11196	0,17417	1,93117	0,26917	0,99713	0,99283	Erfolgreich(100)	
V2018-11-15_10:42	12,0765 6	11,6960	3,07E- 01	2,53E- 01	16,0411 8	1,68405	2,64093	0,29362	3,26E+0 0	2,6787	0,37865	0,0421	2,13E- 01	0,17524	1,83055	0,20352	0,99888	0,9972	Erfolgreich(100)	
V2018-11-15_10:46	88,4830 6	3873,80 533	0,15006	1,97154	11,5169 4	9,21E+0 0	2,72149	2,66947	6,66415	87,5578 1	0,36745	0,36042	0,10401	1,36657	1,88639	1,85033	0,91487	0,78717	Erfolgreich(101)	
V2018-11-15_10:49	0	29,0404 4	2,76E+1 15	1,30E+0 8	15,0438 7	28,0331 6	6,2597	16,0537 7	3,62E- 116	0	0,15975	0,4097	1,91E+1 15	0	4,33889	11,1276 2	0,95464	0,88661	Erfolgreich(100)	

	A1_wer t	A1_Stan- dard- fehler	A2_wer t	A2_Stan- dard- fehler	t1_wert	t1_Stan- dard- fehler	t2_wert	t2_Stan- dard- fehler	k1_wer t	k1_Stan- dard- fehler	k2_wer t	k2_Stan- dard- fehler	tau1_w ert	tau1_St andard- fehler	tau2_w ert	tau2_St andard- fehler	R- Quad- rat (COD)	Kor. R- Quad- rat	Fit-Status
V2018-11-15_10:53	8,70185	261,180 05	1,69E+2 4	1,40E+4 9	5,26178	254,028 4	2,13E+0 0	8,39E+0 1	5,93E- 25	4,90596	4,68E- 01	18,4136 1	1,17E+2 4	9,67E+4 8	1,48E+0 0	58,1596 5	0,7222	0,30551	Erfolgreich(101)
V2018-11-15_10:55	0	--	0	--	100,000 76	--	0,78675	--	--	--	1,27106	6,53869	0	10,1447 9	0,54533	2,80534	49,2383	- 124,595 74	Fehlgeschlagen(-104)
V2018-11-15_11:00	100	--	676,706 54	--	43,3097 9	--	2,38041	--	0,00148	0,40431	0,4201	0,1444	469,057 23	128332, 909	1,64997	0,56713	0,86543	0,66358	Fehlgeschlagen(-104)
V2018-11-15_11:05	4,54436	2,00587	8,76829	10,3152 2	25,7832	1,05448	0,66185	0,09349	0,11405	0,13417	1,51092	0,21343	6,07772	7,14997	0,45876	0,0648	0,99965	0,99913	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:08	0	25,9668 7	3,13E+1 09	3,59E+0 8	15,3372	24,5814 3	5,0775	12,1768 1	3,19E- 110	0	0,19695	0,47232	2,17E+1 09	0	3,51946	8,44032	0,94135	0,85339	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:15	11,1508 9	2,90529	6,74E- 01	3,22E- 01	11,5012 5	4,33965	3,38353	1,24629	1,48E+0 0	0,70869	0,29555	0,10886	4,67E- 01	0,22318	2,34528	0,86387	0,99939	0,99848	Erfolgreich(100)
V2018-11-15_11:18	0	--	0	--	0	--	0	--	--	0	--	0	0	0	0	0	0	0,99848	Fehlgeschlagen(-207)
V2018-11-23_11:54	92,9716 5	18003,4 254	0,09555	3,43556	7,02833	2,59133	0,8258	0,13974	10,4659 7	376,319 59	1,21094	0,20491	6,62E- 02	2,38135	0,5724	0,09686	0,99867	0,99668	Erfolgreich(100)
V2018-11-23_13:13	94,3124 5	1697,26 187	0,10408	0,38135	5,68755	0,58563	0,84073	0,04018	9,60824 7	35,2052 7	1,18944	0,05685	7,21E- 02	0,26433	0,58275	0,02785	0,99991	0,99977	Erfolgreich(100)
V2018-11-23_13:48	29,5439 2	70,8636 8	0,15114	0,11361	5,21647	0,42781	1,06392	0,04761	6,61618	4,97321	0,93992	0,04206	1,05E- 01	0,07875	0,73745	0,033	0,99989	0,99972	Erfolgreich(100)
Mittelung aus Versu- chen in Sk 1	86,3327 7	590,437 7	0,14713	0,29568	13,6672 3	1,28167	2,49604	0,26588	6,79665	13,6587 7	0,40063	0,04268	0,10198	2,05E- 01	1,73012	0,1843	0,99806	0,99516	Erfolgreich(101)
Mittelung aus Versu- chen in Sk 2	84,9816	9251,27 12	0,11458	2,77451	15,0184	1,87863	5,14057	1,43812	8,72725	211,320 72	0,19453	0,05442	0,07942	1,92E+0 0	3,56317	0,99683	0,97437	0,93593	Erfolgreich(100)

Tabelle A-9: Parameterwerte der Regression des longitudinalen Konzentrationsverlaufs auf Basis von Exponentialfunktion  $c_3(x) = a_0 \cdot e^{-x/k_0} + a_1 \cdot e^{-x/k_1}$  mit  $a_0 > 0$  Vol-%,  $a_1 \neq 0$  Vol-% und  $k_0 > 0, k_1 \neq 0$

## A14 Ermittlung der Nomogrammparameter aus Regressionskurven

	<i>Fr_DT</i>	<i>cm/c0=0,1</i>	<i>cm/c0=0,05</i>	<i>cm/c0=0,02</i>	<i>cm/c0=0,01</i>	<i>cm/c0=0,005</i>	<i>cm/c0=0,002</i>
V2018-10-18_13:42	34,71588	–	0,44811	1,25713	1,86914	2,48114	3,29016
V2018-10-18_13:46	19,32424	0,5588	1,43921	2,60305	3,48347	4,36388	5,52772
V2018-10-18_13:52	12,74925	1,22736	2,27412	3,65787	4,70464	5,75141	7,13516
V2018-10-18_13:55	8,41136	2,2569	4,56043	7,60554	9,90908	12,21262	15,25773
V2018-10-18_14:02	9,99608	1,66438	3,16926	5,1586	6,66348	8,16836	10,1577
V2018-10-18_14:06	5,54943	3,87802	9,69145	17,37639	23,18981	29,00324	36,68818
V2018-10-18_14:09	7,35733	2,74737	5,78005	9,78904	12,82172	15,8544	19,86339
V2018-10-18_14:13	6,59495	3,14061	7,00494	12,11331	15,97764	19,84198	24,95034
V2018-10-18_14:16	6,01234	3,4209	7,96503	13,97204	18,51617	23,06031	29,06732
V2018-10-18_14:32	69,43176	–	0,54326	1,38299	2,01822	2,65344	3,49317
V2018-10-18_14:35	38,64848	0	1,05782	2,45504	3,512	4,56896	5,96618
V2018-10-18_14:39*	25,49849	0,74772	2,26427	4,26903	5,78557	7,30211	9,30688
V2018-10-18_14:42	19,99216	1,329	3,0307	5,28022	6,98192	8,68362	10,93314
V2018-10-18_14:45	16,82273	1,53346	3,52587	6,1597	8,15211	10,14453	12,77835
V2018-10-18_14:48**	13,18991	2,21443	5,44618	9,71831	12,95005	16,1818	20,45393
V2018-10-18_15:13	26,85088	1,04514	2,42309	4,24464	5,62259	7,00054	8,82209
V2018-10-18_15:16	34,24627	0,58787	1,61241	2,96678	3,99132	5,01587	6,37024
V2018-10-18_15:19	51,90764	0,38119	1,03926	1,90918	2,56724	3,22531	4,09522
V2018-10-18_15:23	78,67727	0,32501	0,8357	1,5108	2,0215	2,53219	3,20729
V2018-10-18_15:26	141,34322	–	0,48437	1,16563	1,68099	2,19634	2,87761
V2018-10-22_13:22	11,09886	1,95557	4,89302	8,77611	11,71356	14,65101	18,53411
V2018-10-22_15:03	210,77498	–	0,18867	0,54978	0,82294	1,0961	1,45721
V2018-10-22_15:07	117,32576	–	0,33293	0,78884	1,13373	1,47861	1,93452
V2018-10-22_15:10	77,40613	0,32333	0,65702	1,09814	1,43184	1,76553	2,20665
V2018-10-22_15:13	60,69049	0,47072	0,84462	1,33889	1,71278	2,08668	2,58095
V2018-10-22_15:16	51,069	0,40068	1,03288	1,8686	2,5008	3,13299	3,96871
V2018-10-24_14:42	424,02966	–	–	–	–	0,09428	0,54805

<i>Fr_DT</i>	<i>cm/c0=0,1</i>	<i>cm/c0=0,05</i>	<i>cm/c0=0,02</i>	<i>cm/c0=0,01</i>	<i>cm/c0=0,005</i>	<i>cm/c0=0,002</i>	
V2018-10-24_14:51	236,03182	--	--	0,39398	0,75501	1,11603	1,59328
V2018-10-24_14:54	155,72292	--	0,16656	0,61069	0,94666	1,28263	1,72676
V2018-10-24_14:57	122,09498	--	0,24794	0,58478	0,8396	1,09441	1,43125
V2018-10-24_15:00	102,73882	0,05388	0,31484	0,6598	0,92076	1,18171	1,52668
V2018-10-24_15:04	80,55264	0,16366	0,41191	0,74007	0,98831	1,23656	1,56472
V2018-10-24_15:07	40,69833	0,53851	1,3555	2,43551	3,2525	4,06949	5,1495
V2018-10-26_13:55*	25,49849	0,67706	2,07903	3,93232	5,33429	6,73625	8,58955
V2018-10-26_14:04*	25,49849	0,91947	2,48013	4,54322	6,10388	7,66454	9,72762
V2018-10-29_10:43	22,59411	1,51105	3,13479	5,28125	6,90499	8,52873	10,6752
V2018-10-29_11:55	25,49849	1,21048	2,33643	3,82486	4,95081	6,07676	7,56519
V2018-10-29_14:05*	25,49849	1,23507	2,19862	3,47236	4,43591	5,39946	6,6732
V2018-10-31_13:00*	25,49849	1,25191	2,70401	4,62358	6,07568	7,52778	9,44736
V2018-11-01_10:33*	25,49849	1,17258	2,4349	4,1036	5,36593	6,62825	8,29695
V2018-11-01_13:29	52,61943	--	0,43315	1,25121	1,87006	2,4889	3,30696
V2018-11-05_11:47	52,61943	--	0,39611	1,06738	1,57518	2,08298	2,75426
V2018-11-05_13:33**	13,18991	2,06566	5,16723	9,26727	12,36884	15,4704	19,57045
V2018-11-08_10:57*	25,49849	0,78464	2,23757	4,15822	5,61114	7,06406	8,98472
V2018-11-08_11:00**	13,18991	1,66765	4,37428	7,95226	10,6589	13,36553	16,94351
V2018-11-08_11:59	40,04079	0,67943	1,22582	1,94811	2,4945	3,04089	3,76318
V2018-11-08_12:37	67,78234	0,49127	0,91442	1,47378	1,89692	2,32007	2,87943
V2018-11-08_12:42	33,69298	0,88234	1,60375	2,5574	3,27881	4,00022	4,95388
V2018-11-08_12:46*	25,49849	0,95354	2,50109	4,54685	6,0944	7,64196	9,68771
V2018-11-08_12:49**	13,18991	2,5299	5,85134	10,24203	13,56346	16,8849	21,27559
V2018-11-08_13:35*	25,49849	1,27193	2,69455	4,57515	5,99777	7,42039	9,30099
V2018-11-08_13:37**	13,18991	2,48055	7,34851	13,7836	18,65156	23,51952	29,95462
V2018-11-15_10:30	25,49849	1,2678	2,69228	4,57533	5,99981	7,42428	9,30734
V2018-11-15_10:42	23,2459	1,39947	2,91964	4,9292	6,44937	7,96953	9,97909
V2018-11-15_10:46	28,44613	1,04513	2,15875	3,63086	4,74448	5,85809	7,33021
V2018-11-15_10:49	12,76889	2,55616	6,89418	12,62873	16,96675	21,30477	27,03932

$Fr_{DT}$	$cm/c0=0,1$	$cm/c0=0,05$	$cm/c0=0,02$	$cm/c0=0,01$	$cm/c0=0,005$	$cm/c0=0,002$
V2018-11-15_10:53	13,6501	2,4699	6,25677	11,26273	15,0496	23,84243
V2018-11-15_10:55	13,18991	2,66599	7,32079	13,4741	18,1289	28,93701
V2018-11-15_11:00	25,49849	1,20233	2,48908	4,19007	5,47682	8,46456
V2018-11-15_11:05	29,14113	1,08875	2,01516	3,23981	4,16623	6,31729
V2018-11-15_11:08	15,07418	2,17135	5,68943	10,34008	13,85816	22,02689
V2018-11-15_11:15	21,85585	1,29728	2,7352	4,63602	6,07394	9,41268
V2018-11-15_11:18	11,30563	–	–	–	–	–
V2018-11-23_11:54	52,61943	–	0,37248	1,0681	1,59432	2,81616
V2018-11-23_13:13	52,61943	–	0,29687	0,95307	1,44947	2,60207
V2018-11-23_13:48	52,61943	–	0,34467	1,12034	1,70712	3,06957
Mittelung Sk 1	25,5	1,03365	2,40373	4,21487	5,58495	8,76616
Mittelung Sk 2	13,2	2,10757	5,28422	9,48353	12,66018	20,03613

Tabelle A-10: Aus Regressionskurven berechnete Nomogrammparameter für  $x/L_{ccT}$  bei  $Fr_{DT}$

## A15 Ergebnis der Regression der Nomogrammparameter

	$cm/c0=0,1$	$cm/c0=0,05$	$cm/c0=0,02$	$cm/c0=0,01$	$cm/c0=0,005$	$cm/c0=0,002$
A_Wert	15,56299	38,39084	66,57852	87,78614	109,15436	137,12647
A_Standardfehler	2,08201	6,12296	11,36858	15,39327	19,27694	24,54634
B_Wert	0,82245	0,84178	0,83438	0,8314	0,83022	0,82837
B_Standardfehler	0,05346	0,06362	0,06793	0,0697	0,07016	0,07107
Anzahl der Punkte	53	60	61	61	62	62
Freiheitsgrade	51	58	59	59	60	60
Chi-Quadr Reduziert	0,127	1,0589	3,80886	7,09146	11,21693	18,36276
Summe der Fehlerquadrate	6,47681	61,41631	224,72282	418,39609	673,01593	1101,76542
R-Quadrat (COD)	0,84476	0,80142	0,77628	0,76525	0,76403	0,75781
Kor. R-Quadrat	0,84171	0,79799	0,77248	0,76127	0,76009	0,75377
Fit-Status	Erfolgreich(100)	Erfolgreich(100)	Erfolgreich(100)	Erfolgreich(100)	Erfolgreich(100)	Erfolgreich(100)

Tabelle A-11: Parameterwerte der Regression der Potenzfunktionen  $x/L_{ccT}(cm/c0, Fr_{DT}) = A \cdot Fr_{DT}^{-B}$

## A16 Datenübersicht der Versuche im Großversuchsstand

Versuchs-Nummer	VO2018-12-11	Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	11.12.2018	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5		USAM1	USAM2	
		Turm	Eingangportal	Tunnelfront	Tunnelende	Ausgangportal		(an Quelle)		
		1,44	0,26	0,26	0,14	0,25	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,22	0,56	
Quellbedingungen		Standardabweichung des Windes $u_{W,RMS}$ [m/s]						Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,12	0,12
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$5,5 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)			346,71			Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?	nein	
Freisetzungsbeginn	13:43:00	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 1								
Freisetzungsende	13:49:00	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert <sup>Standardabweichung</sup></p>								
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:00									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	10,90									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$31,74 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$22,22 \cdot 10^{-3}$									
sonstige Bedingungen/ Bemerkungen										
Dimensionslose Parameter										
$Fr_D$	0,65									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	85									

Tabelle A-12: Datenübersicht zu Versuch VO2018-12-11

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel				
Datum	12.12.2018		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	1,17	0,11	0,12	0,12	0,23	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,25	0,57	
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,18	0,08	0,07	0,09	0,23	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,12	0,09	
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$										
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$5,5 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				305,19	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				nein
Freisetzungsbeginn	12:01:00	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 1									
Freisetzungsende	12:07:00										
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:00										
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	10,9										
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$30,46 \cdot 10^{-3}$										
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$21,32 \cdot 10^{-3}$										
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>											
<b>Dimensionslose Parameter</b>											
$Fr_D$	0,66										
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	86										

Tabelle A-13: Datenübersicht zu Versuch VO2018-12-12\_1

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	12.12.2018		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_W$ [m/s]	1,41	0,25	0,18	0,12	0,35	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,23	0,55
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{W,RMS}$ [m/s]	0,64	0,44	0,24	0,13	0,42	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,13	0,12
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$5,5 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				328,54			Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?	nein
Freisetzungsbeginn	13:39:00	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 1								
Freisetzungsende	13:46:00									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	07:00									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	11,30									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$28,17 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$19,72 \cdot 10^{-3}$									
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>		Geringe Freisetzungsrate								
<b>Dimensionslose Parameter</b>										
$Fr_D$	0,65									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	89									

Tabelle A-14: Datenübersicht zu Versuch VO2018-12-12\_2

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel				
Datum	13.12.2018		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	2,12	1,51	0,51	0,16	0,53	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,13	0,52	
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,56	0,93	0,37	0,19	0,40	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,15	0,11	
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$										
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$6 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				332,76	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				ja
Freisetzungsbeginn	12:26:00	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 1									
Freisetzungsende	12:31:00										
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	5:00										
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	9,7										
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$33,05 \cdot 10^{-3}$										
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$23,14 \cdot 10^{-3}$										
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>											
<b>Dimensionslose Parameter</b>											
$Fr_D$	0,60										
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	83										

Tabelle A-15: Datenübersicht zu Versuch VO2018-12-13

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel				
Datum	18.12.2018		1.1 Turm	1.2 Eingangsportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangsportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	2,14	1,87	0,56	0,19	1,33	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,38	0,45	
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,87	1,24	0,36	0,08	0,70	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,16	0,13	
Axiale Quellentfernung von Eingangsportal	$2,08b_T$										
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				35,03	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				nein
Freisetzungsbeginn	11:44:00	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 1									
Freisetzungsende	11:49:00	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert <sup>Standardabweichung</sup></p>									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	05:00										
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	12,32										
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$44,39 \cdot 10^{-3}$										
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$31,08 \cdot 10^{-3}$										
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>											
kurze Versuchsdauer											
<b>Dimensionslose Parameter</b>											
$Fr_D$	0,49										
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	74										

Tabelle A-16: Datenübersicht zu Versuch VO2018-12-18

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	20.12.2018		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	1,90	0,35	0,46	0,17	0,55	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,51	0,61
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,63	0,57	0,36	0,05	0,42	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,29	0,10
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$1,04b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				354,04	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?		nein	
Freisetzungsbeginn	11:36:00	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 2						
Freisetzungsende	11:42:30									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:30									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	16,7									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$44,44 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$31,11 \cdot 10^{-3}$									
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>										
2. Waage unter Quellboden										
<b>Dimensionslose Parameter</b>										
$Fr_D$	0,66									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	74									

Tabelle A-17: Datenübersicht zu Versuch VO2018-12-20

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	09.01.2019	1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	2,83	2,02	1,55	0,56	1,23	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,33	0,37
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	1,47	1,63	1,17	0,83	1,16	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,29	0,24
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$1,04b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				297,20	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?		nein	
Freisetzungsbeginn	12:15:30	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 2						
Freisetzungsende	12:22:00									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:30									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	19									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$49,64 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$34,75 \cdot 10^{-3}$									
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>		2. Waage unter Quellboden								
<b>Dimensionslose Parameter</b>										
$Fr_D$	0,39									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	71									

Tabelle A-18: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-09

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	10.01.2019	1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_W$ [m/s]	1,80	0,89	0,61	0,15	0,48	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,50	0,45
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{W,RMS}$ [m/s]	1,01	1,01	0,73	0,20	0,62	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,21	0,15
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$1,04b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)			6,33				Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?	nein
Freisetzungsbeginn	11:41:30	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 3								
Freisetzungsende	11:48:00									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:30									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	18,8									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$46,35 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$32,44 \cdot 10^{-3}$									
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>										
2. Waage unter Quellboden										
<b>Dimensionslose Parameter</b>										
$Fr_D$	0,48									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	73									

Tabelle A-19: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-10\_1

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	10.01.2019		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_W$ [m/s]	1,71	0,79	0,57	0,11	0,56	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,12	0,41
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{W,RMS}$ [m/s]	0,78	0,83	0,44	0,11	0,51	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,16	0,14
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$1,04b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				331,32			Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?	ja
Freisetzungsbeginn	14:25:30	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 3						
Freisetzungsende	14:34:30	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert    Standardabweichung</p>								
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	9:00									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	21,3									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$38,55 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$26,99 \cdot 10^{-3}$									
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>		2. Waage unter Quellboden								
<b>Dimensionslose Parameter</b>										
$Fr_D$	0,46									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	78									

Tabelle A-20: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-10\_2

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel				
Datum	11.01.2019		1.1 Turm	1.2 Eingangsportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangsportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	2,60	1,71	0,48	0,14	1,02	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,13	0,50	
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,95	1,45	0,48	0,26	0,69	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,15	0,11	
Axiale Quellentfernung von Eingangsportal	$1,04b_T$										
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				2,53	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				ja
Freisetzungsbeginn	10:35:00	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 4							
Freisetzungsende	10:41:30	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert <sup>Standardabweichung</sup></p>									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:30										
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	20,5										
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$50,71 \cdot 10^{-3}$										
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$35,50 \cdot 10^{-3}$										
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>											
2. Waage unter Quellboden											
zus. Kameras rechts und links von Quelle											
Hohe Freisetzungsrate											
<b>Dimensionslose Parameter</b>											
$Fr_D$	0,53										
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	70										

Tabelle A-21: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-11\_1

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel			
Datum	11.01.2019	1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	3,51	2,86	0,85	0,12	1,76	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,24	0,47
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,88	1,44	0,61	0,15	0,89	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,21	0,14
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$1,04b_T$									
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)			32,73				Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?	nein
Freisetzungsbeginn	12:29:00	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 4								
Freisetzungsende	12:35:00									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	06:00									
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	16,6									
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$45,18 \cdot 10^{-3}$									
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$31,63 \cdot 10^{-3}$									
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>										
2. Waage unter Quellboden										
zus. Kamera rechts und links von Quelle										
<b>Dimensionslose Parameter</b>										
$Fr_D$	0,51									
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	73									

$x/b_T$	$y/b_T$	Concentration [Vol-%]
0.5	0.5	1.85
1.0	0.5	1.04
1.5	0.5	0.66
2.0	0.5	0.48
2.5	0.5	0.32
3.0	0.5	0.27
0.5	0.0	1.12
1.0	0.0	0.89
1.5	0.0	0.66
2.0	0.0	0.47
2.5	0.0	0.39
3.0	0.0	0.29
0.5	-0.2	1.29
1.0	-0.2	0.90
1.5	-0.2	0.52
2.0	-0.2	0.42
2.5	-0.2	0.36
3.0	-0.2	0.31
1.5	0.5	0.45
2.0	0.5	0.37
2.5	0.5	0.20
3.0	0.5	0.15
1.5	0.0	0.44
2.0	0.0	0.27
2.5	0.0	0.22
3.0	0.0	0.17
1.5	-0.5	0.26
2.0	-0.5	0.22
2.5	-0.5	0.18
3.0	-0.5	0.17

Tabelle A-22: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-11\_2

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel																																																																							
Datum	16.01.2019	1.1 Turm	1.2 Eingangsportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangsportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2																																																																					
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	3,76	3,78	1,44	0,15	2,18	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,16	0,58																																																																				
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	1,04	1,85	0,91	0,39	1,20	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,19	0,21																																																																				
Axiale Quellentfernung von Eingangsportal	$1,04b_T$																																																																													
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$5,8 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)			49,76				Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?	ja																																																																				
Freisetzungsbeginn	10:19:00	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 4																																																																										
Freisetzungsende	10:29:15	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert <sup>Standardabweichung</sup></p> <table border="1"> <caption>Concentration Measurement Data Points</caption> <thead> <tr> <th>x/b<sub>T</sub></th> <th>y/b<sub>T</sub></th> <th>Mittelwert [Vol-%]</th> <th>Standardabweichung [Vol-%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5</td><td>0.30</td><td>1,40</td><td>0,75</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>-0.30</td><td>1,12</td><td>1,02</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>0.30</td><td>0,93</td><td>0,60</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>-0.30</td><td>0,76</td><td>0,69</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>0.30</td><td>0,57</td><td>0,47</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>-0.30</td><td>0,50</td><td>0,35</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>0.50</td><td>0,39</td><td>0,42</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>-0.50</td><td>0,29</td><td>0,19</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>0.30</td><td>0,46</td><td>0,31</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>-0.30</td><td>0,42</td><td>0,24</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>0.30</td><td>0,34</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>-0.30</td><td>0,33</td><td>0,18</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>0.50</td><td>0,34</td><td>0,24</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>0.30</td><td>0,27</td><td>0,17</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>-0.30</td><td>0,29</td><td>0,16</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>0.50</td><td>0,29</td><td>0,17</td></tr> </tbody> </table>									x/b <sub>T</sub>	y/b <sub>T</sub>	Mittelwert [Vol-%]	Standardabweichung [Vol-%]	0.5	0.30	1,40	0,75	0.5	-0.30	1,12	1,02	1.0	0.30	0,93	0,60	1.0	-0.30	0,76	0,69	1.5	0.30	0,57	0,47	1.5	-0.30	0,50	0,35	1.5	0.50	0,39	0,42	1.5	-0.50	0,29	0,19	2.0	0.30	0,46	0,31	2.0	-0.30	0,42	0,24	2.5	0.30	0,34	0,20	2.5	-0.30	0,33	0,18	2.5	0.50	0,34	0,24	3.0	0.30	0,27	0,17	3.0	-0.30	0,29	0,16	3.0	0.50	0,29	0,17
x/b <sub>T</sub>	y/b <sub>T</sub>										Mittelwert [Vol-%]	Standardabweichung [Vol-%]																																																																		
0.5	0.30										1,40	0,75																																																																		
0.5	-0.30										1,12	1,02																																																																		
1.0	0.30										0,93	0,60																																																																		
1.0	-0.30	0,76	0,69																																																																											
1.5	0.30	0,57	0,47																																																																											
1.5	-0.30	0,50	0,35																																																																											
1.5	0.50	0,39	0,42																																																																											
1.5	-0.50	0,29	0,19																																																																											
2.0	0.30	0,46	0,31																																																																											
2.0	-0.30	0,42	0,24																																																																											
2.5	0.30	0,34	0,20																																																																											
2.5	-0.30	0,33	0,18																																																																											
2.5	0.50	0,34	0,24																																																																											
3.0	0.30	0,27	0,17																																																																											
3.0	-0.30	0,29	0,16																																																																											
3.0	0.50	0,29	0,17																																																																											
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	10:15																																																																													
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	25																																																																													
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$39,05 \cdot 10^{-3}$																																																																													
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$27,34 \cdot 10^{-3}$																																																																													
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>		zus. Kameras rechts und links von Hindernis																																																																												
<b>Dimensionslose Parameter</b>																																																																														
$Fr_D$	0,65																																																																													
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	78																																																																													

Tabelle A-23: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-16\_1

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel				
Datum	16.01.2019		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2	
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_W$ [m/s]	4,09	3,87	1,30	0,27	2,70	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,38	0,46	
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{W,RMS}$ [m/s]	0,97	1,56	0,78	0,60	1,44	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,22	0,20	
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$										
Flaschenstützdruck $p_{st\ddot{u}tz}$ [Pa]	$5,8 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				330,14	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				nein
Freisetzungsbeginn	13:48:30	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 5							
Freisetzungsende	14:02:00	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert    ■ Standardabweichung</p>									
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	13:30										
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	26,3										
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$31,36 \cdot 10^{-3}$										
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$21,95 \cdot 10^{-3}$										
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>		zus. Kameras rechts und links von Quelle									
<b>Dimensionslose Parameter</b>											
$Fr_D$	0,53										
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	85										

Tabelle A-24: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-16\_2

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel				
Datum	18.01.2019	1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2		
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	3,00	1,94	1,35	0,24	1,32	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,28	0,31	
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,99	1,27	0,98	0,45	1,06	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,26	0,27	
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$										
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$6,2 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				279,69	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				nein
Freisetzungsbeginn	10:34:30	<b>Konzentrationsmessung</b> PIR-Layout 5									
Freisetzungsende	10:42:30										
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	08:00										
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	23,7										
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$49,52 \cdot 10^{-3}$										
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$34,66 \cdot 10^{-3}$										
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>											
zus. Kameras rechts und links von Quelle											
Hohe Freisetzungsrate											
<b>Dimensionslose Parameter</b>											
$Fr_D$	0,33										
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	71										

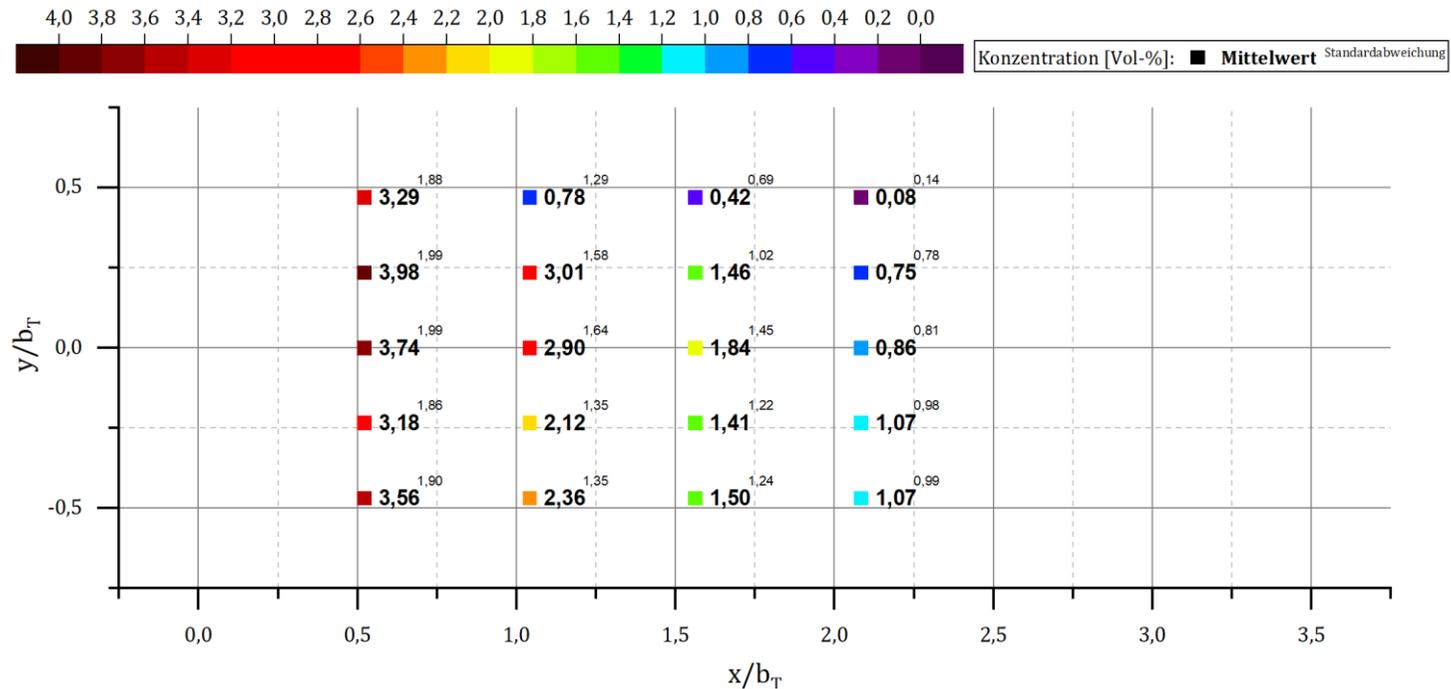


Tabelle A-25: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-18\_1

Versuchs-Nummer		Windbedingungen					Strömungsbedingungen im Tunnel																																																																																							
Datum	18.01.2019		1.1 Turm	1.2 Eingangportal	1.3 Tunnelfront	1.4 Tunnelende	1.5 Ausgangportal		USAM1 (an Quelle)	USAM2																																																																																				
		mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}_w$ [m/s]	2,95	2,06	1,19	0,29	1,44	Mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ [m/s]	0,36	0,39																																																																																				
<b>Quellbedingungen</b>		Standardabweichung des Windes $u_{w,RMS}$ [m/s]	0,85	1,21	0,87	0,47	0,87	Standardabweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeit $u_{RMS}$ [m/s]	0,18	0,20																																																																																				
Axiale Quellentfernung von Eingangportal	$2,08b_T$																																																																																													
Flaschenstützdruck $p_{stütz}$ [Pa]	$6 \cdot 10^5$	Mittlere tunnelbezogene Windrichtung [°] (0° bzw. 360° entspricht Ventilationsrichtung)				359,55	Hindernis bei $x_{IH} = 0,25b_T$ vorhanden?				nein																																																																																			
Freisetzungsbeginn	13:44:30	<b>Konzentrationsmessung</b>		PIR-Layout 5																																																																																										
Freisetzungsende	13:53:00	<p>Konzentration [Vol-%]: ■ Mittelwert    ■ Standardabweichung</p> <table border="1"> <caption>Data points from PIR-Layout 5 diagram</caption> <thead> <tr> <th><math>x/b_T</math></th> <th><math>y/b_T</math></th> <th>Mittelwert [Vol-%]</th> <th>Standardabweichung [Vol-%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,5</td><td>0,5</td><td>3,18</td><td>1,41</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,5</td><td>1,49</td><td>1,13</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>0,5</td><td>1,05</td><td>0,64</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>0,5</td><td>0,67</td><td>0,42</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>0,25</td><td>3,11</td><td>1,64</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,25</td><td>2,15</td><td>1,03</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>0,25</td><td>1,29</td><td>0,61</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>0,25</td><td>0,76</td><td>0,43</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>0,0</td><td>3,29</td><td>1,81</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,0</td><td>2,09</td><td>0,83</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>0,0</td><td>1,51</td><td>0,61</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>0,0</td><td>0,65</td><td>0,45</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>-0,25</td><td>2,75</td><td>1,41</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>-0,25</td><td>1,54</td><td>1,10</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>-0,25</td><td>0,94</td><td>0,72</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>-0,25</td><td>0,51</td><td>0,55</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>-0,5</td><td>2,38</td><td>1,77</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>-0,5</td><td>0,97</td><td>1,20</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>-0,5</td><td>0,30</td><td>0,64</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>-0,5</td><td>0,22</td><td>0,52</td></tr> </tbody> </table>									$x/b_T$	$y/b_T$	Mittelwert [Vol-%]	Standardabweichung [Vol-%]	0,5	0,5	3,18	1,41	1,0	0,5	1,49	1,13	1,5	0,5	1,05	0,64	2,0	0,5	0,67	0,42	0,5	0,25	3,11	1,64	1,0	0,25	2,15	1,03	1,5	0,25	1,29	0,61	2,0	0,25	0,76	0,43	0,5	0,0	3,29	1,81	1,0	0,0	2,09	0,83	1,5	0,0	1,51	0,61	2,0	0,0	0,65	0,45	0,5	-0,25	2,75	1,41	1,0	-0,25	1,54	1,10	1,5	-0,25	0,94	0,72	2,0	-0,25	0,51	0,55	0,5	-0,5	2,38	1,77	1,0	-0,5	0,97	1,20	1,5	-0,5	0,30	0,64	2,0	-0,5	0,22	0,52
$x/b_T$	$y/b_T$										Mittelwert [Vol-%]	Standardabweichung [Vol-%]																																																																																		
0,5	0,5										3,18	1,41																																																																																		
1,0	0,5										1,49	1,13																																																																																		
1,5	0,5										1,05	0,64																																																																																		
2,0	0,5	0,67	0,42																																																																																											
0,5	0,25	3,11	1,64																																																																																											
1,0	0,25	2,15	1,03																																																																																											
1,5	0,25	1,29	0,61																																																																																											
2,0	0,25	0,76	0,43																																																																																											
0,5	0,0	3,29	1,81																																																																																											
1,0	0,0	2,09	0,83																																																																																											
1,5	0,0	1,51	0,61																																																																																											
2,0	0,0	0,65	0,45																																																																																											
0,5	-0,25	2,75	1,41																																																																																											
1,0	-0,25	1,54	1,10																																																																																											
1,5	-0,25	0,94	0,72																																																																																											
2,0	-0,25	0,51	0,55																																																																																											
0,5	-0,5	2,38	1,77																																																																																											
1,0	-0,5	0,97	1,20																																																																																											
1,5	-0,5	0,30	0,64																																																																																											
2,0	-0,5	0,22	0,52																																																																																											
Freisetzungsdauer $\Delta t_Q$ [min: s]	08:30																																																																																													
Freigesetzte Gesamtmasse $m$ [kg]	20,6																																																																																													
Mittlere Gesamtfreisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gesamt}$ [kg/s]	$38,67 \cdot 10^{-3}$																																																																																													
Mittlere gasförmige Freisetzungsrate $\dot{m}_{Q,gas}$ [kg/s]	$27,07 \cdot 10^{-3}$																																																																																													
<b>sonstige Bedingungen/ Bemerkungen</b>																																																																																														
zus. Kameras rechts und links von Quelle																																																																																														
<b>Dimensionslose Parameter</b>																																																																																														
$Fr_D$	0,43																																																																																													
$Fr_{DT} = Fr_D \cdot b_t/L_Q$	78																																																																																													

Tabelle A-26: Datenübersicht zu Versuch VO2019-01-18\_2

## A17 Verlauf der Luftfeuchte und Umgebungstemperatur während Messkampagne im Großversuchsstand

Gerätename: 174H_03		20.12.2018 14:08:10			Seite 1/1
Startzeit: 09.12.2018 11:27:00		Minimum	Maximum	Mittelwert	Grenzwerte
Endzeit: 20.12.2018 14:05:00	T [°C]	-3,9	17,8	1,635	-20,0/70,0
Messkanäle: 2	%rH [%rF]	57,1	99,9	93,883	0,0/100,0
Messwerte: 8000					
37263958					
innen					

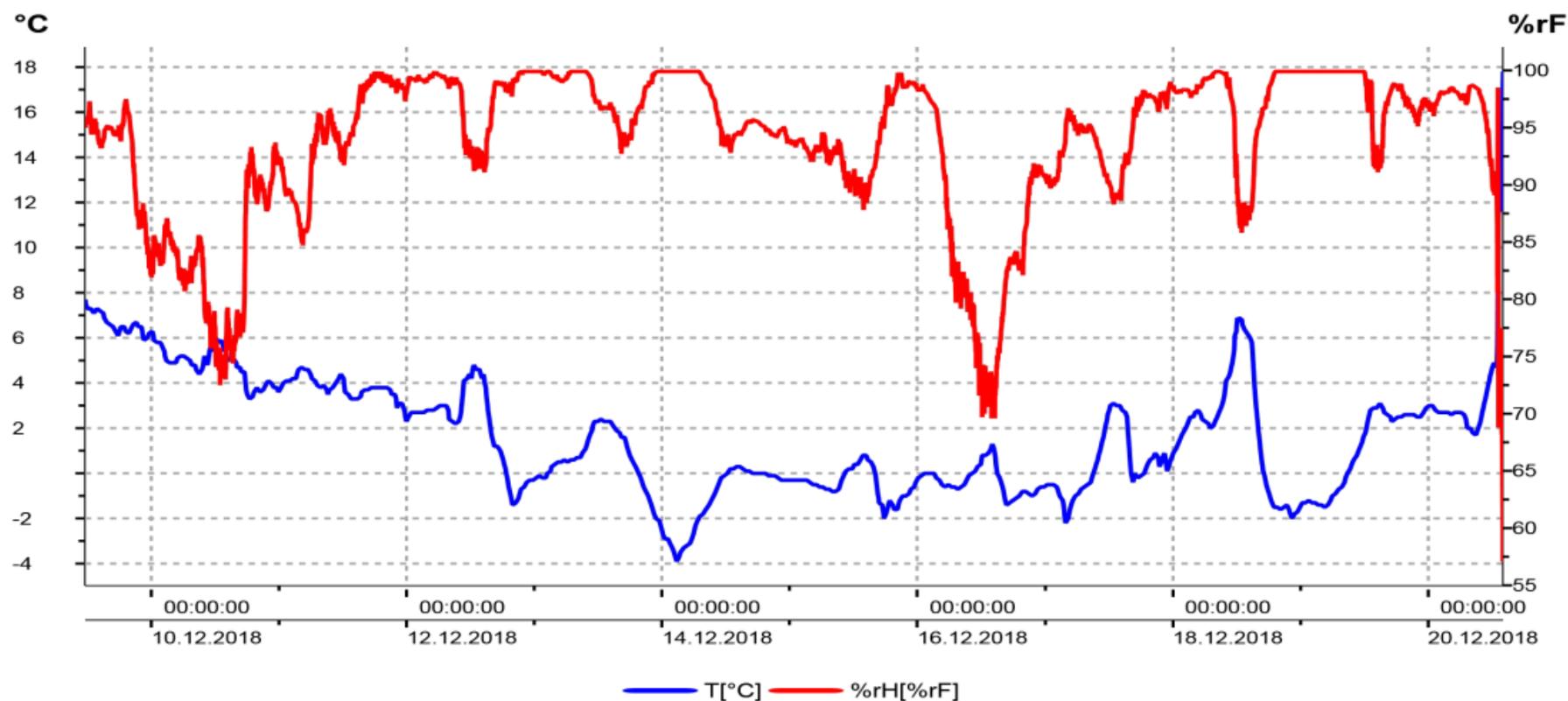


Abbildung A-10: Umgebungstemperatur und relative Feuchte in der Versuchsgeometrie des Großversuchsstands im Zeitraum 10. bis 20. Dezember 2018

Gerätename: 174H_04		18.01.2019 14:21:16			Seite	1/1
Startzeit: 08.01.2019 15:04:00		Minimum	Maximum	Mittelwert	Grenzwerte	
Endzeit: 18.01.2019 14:18:00	T [°C]	-0,9	16,2	3,708	-20,0/70,0	
Messkanäle: 2	%rH [%rF]	49,6	98,5	86,484	0,0/100,0	
Messwerte: 7178						
37263967						
innen						

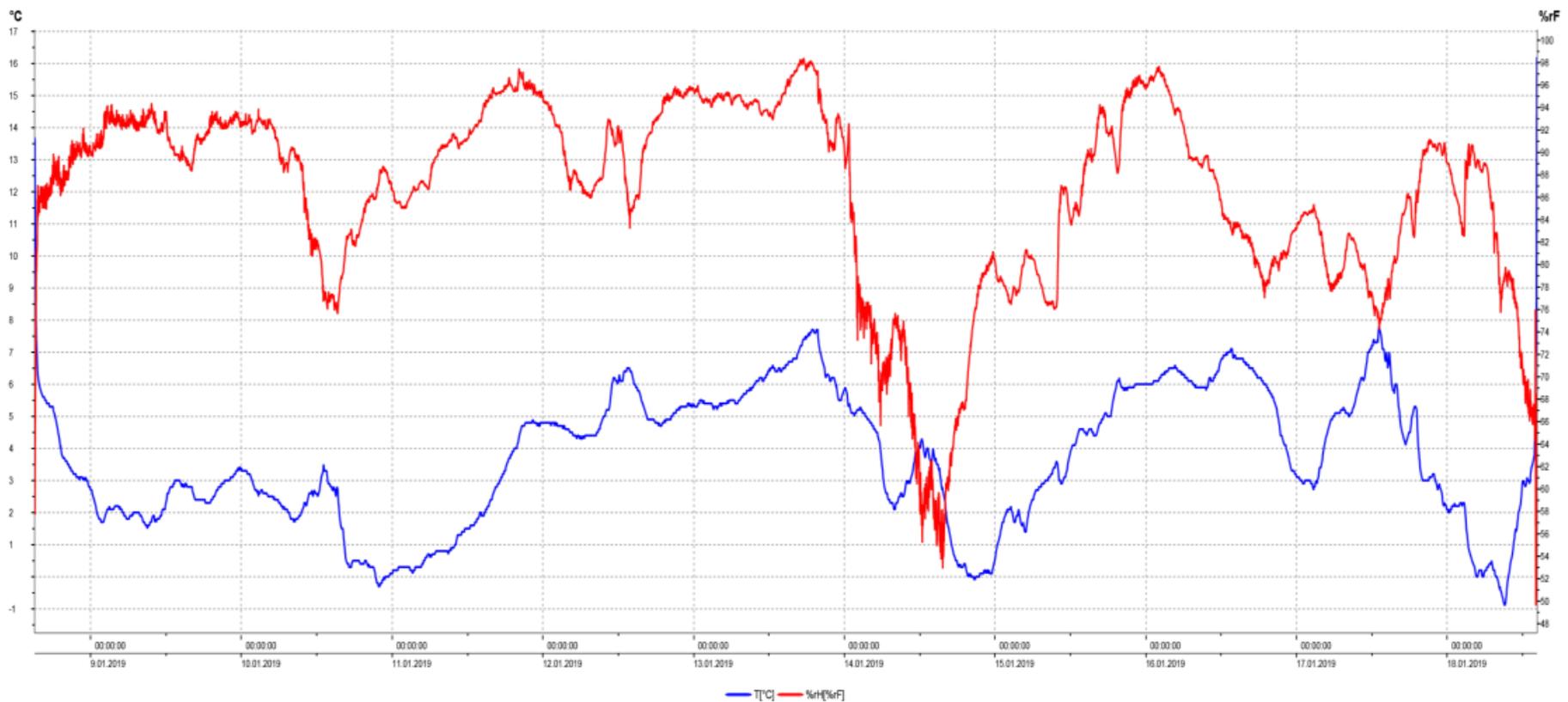


Abbildung A-11: Umgebungstemperatur und relative Feuchte in der Versuchsgometrie des Großversuchsstands im Zeitraum 09. bis 18. Januar 2019

